

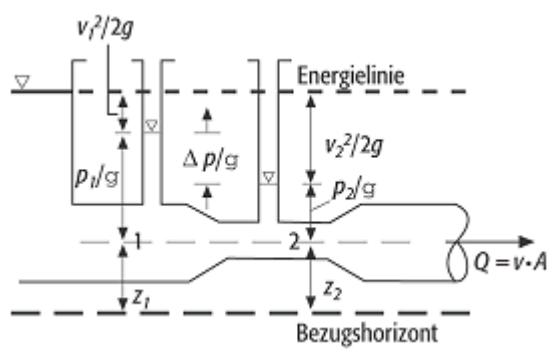
Messtechnik 6

Durchflussmessungen

DLR-Kolloquium - Edition 2014



„Hochwasserableitung des Jangtse durch den Drei-Schluchten-Staudamm“



„Venturi-Rohr: Eine nach dem italienischen Physiker G.B. Venturi benannte Messanordnung zur Bestimmung des Volumenstroms von fließenden Medien.“

Dipl.-Ing. (TU) Wolfgang Stuchlik

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung.....	4
2. Masse- oder Volumenmessung.....	4
2.1 Wichtige Größen der Fluidmechanik.....	5
2.2 Volumenbestimmung und Volumenstrommessung.....	7
2.3 Das Wirkdruckverfahren.....	8
2.3.1 Messung des Volumenstroms mittels Blende.....	9
2.3.2 Messung des Volumenstroms mittels Düse.....	10
2.3.3 Messung des Volumenstroms mittels Venturirohr.....	11
2.4 Durchflussmessung mittel Messturbine.....	12
2.5 Wirbelzähler Durchflussmesser.....	18
2.6 Magnetisch-induktive Durchflussmessung - MID.....	18
2.7 Das Ultraschallverfahren.....	23
2.7.1 Das Laufzeitdifferenzprinzip.....	24
2.7.2 Das Doppler Prinzip.....	26
2.8 Laminar Flow Elemente.....	28
2.8.1 Das LFE-Prinzip.....	28
2.8.2 Charakteristischen Merkmale von Laminar Flow Elementen.....	30
2.8.3 Ein Beispiel eines Messaufbaus der Firma „TetraTec“.....	30
2.9 Staudrucksonden.....	30
2.9.1 Pitot-Rohr.....	31
2.9.2 Das Prandtl'sche Staurohr.....	32
2.9.3 Das Annubar-Prinzip.....	32
2.10 Massestrommessung.....	33
2.10.1 Das Coriolisverfahren.....	33
2.10.2 Das Verfahren nach dem Magnus Effekt.....	37
3. Leistungsmerkmale verschiedener Verfahren.....	39

3.1	Leistungsmerkmale der Staudrucksonde (Fa. WiKA).....	39
3.2	Leistungsmerkmale des Venturirohrs (Fa. WiKa).....	39
3.3	Leistungsmerkmale der Normblende (Fa. WiKa).....	39
3.4	Leistungsmerkmale der Venturidüse (Fa. WiKa).....	39
3.5	Leistungsmerkmale der Annubar Mass ProBar Durchflussmesser.....	39
4.	Auswahlkriterien für bestimmte Verfahren	40
4.1	Allgemein gültigen Anforderungen	40
4.2	Auswahlkriterium – Prozessumfeld „Regelkreis“	40
4.3	Auswahlkriterium – Fehlergrenzen.....	41
4.4	Vergleich verschiedener Messverfahren	42

1. Einführung

Dieser „Technische Bericht“ ist eine Zusammenfassung der gängigsten Fakten aus der Praxis über die möglichen Durchflussmessungen. Er soll bei den Entscheidungsfindungen über das einzusetzende Verfahren helfen und informieren, insbesondere über die zu erwartende Messgenauigkeitsgrenze.

In den einführenden Kapiteln wird nochmals auf die physikalischen Grundlagen und deren wichtigsten Größen eingegangen, damit das notwendige Grundwissen kompakt in einem Dokument zusammengefasst wird. Es ist jedoch kein Ersatz der gängigen Literatur, es ist vielmehr als praktische Arbeitshilfe zu verstehen.

2. Masse- oder Volumenmessung

Die verbindende Größe zwischen Volumen V und Masse m ist die Dichte ρ des Mediums.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Die Dichte eines Mediums ist abhängig von der Temperatur und, soweit sich das Medium komprimieren lässt, auch vom Druck.

Bedingt durch die starre Festkörperstruktur, im Gegensatz zu den frei beweglichen Molekülen, ist im festen Aggregatzustand das Volumen eines Körpers direkt von der Temperatur abhängig. Denken wir nur an so alltägliche Dinge, wie die freien Stromleitungen, die ihre Länge, in Abhängigkeit von der Tagestemperatur, verändern oder die Schienen der Eisenbahn. Hier sind konstruktive Lösungen, wie Zugentlastungen und Passgenauigkeit gefragt, und das ursächliche Problem kann kompensiert werden.

Bei der Messung von Strömungen, werden feste Körper nicht betrachtet. Feste Körper können nicht strömen bzw. fließen. Einen Grenzfall bilden die „nicht Newton’schen“ Flüssigkeiten, die eine extrem hohe Viskosität besitzen. Auch dieser Sonderfall wird hier nicht weiter betrachtet.

Es werden zwei Viskositätstypen unterschieden:

Die dynamische Viskosität: $\eta = \frac{F \cdot \Delta s}{A \cdot \Delta v}$

Es ist das Verhältnis der notwendigen Verschiebearbeit zwischen zwei Fluidschichten, bezogen auf die gemeinsame benetzte Fläche und die Geschwindigkeit der Flächen zueinander.

Die kinematische Viskosität: $\nu = \frac{\eta}{\rho}$

Die kinematische Viskosität ist das Verhältnis der dynamischen Viskosität zur Dichte des Mediums.

Die Dichte ist von der Temperatur und dem Druck abhängig. Chemische Reaktionen benötigen Massen und nicht das Volumen eines Mediums, da die Energie in der Masse steckt.

potenzielle Energie: $W_{pot} = m \cdot g \cdot h$

kinetische Energie: $W_{kin} = \frac{m}{2} v^2$

Mit einem einfachen Löffel (mit einem bekannten Fassungsvermögen) kann das Volumen einer Flüssigkeit abgeschöpft werden. Die Anzahl der Löffelinhale, multipliziert mit dem Löffelfassungsvermögen, ist letztendlich das Ergebnis. Möchte man die Masse wissen, so muss die Temperatur und der Druck zusätzlich gemessen werden, es sei denn, die Dichte ist bereits bekannt oder sie wird direkt und parallel z.B. mit elektro-mechanischen Schwingern gemessen. Auch hier muss ausdrücklich betont werden, dass Masse nicht gleich dem Gewicht bedeutet. Das Gewicht oder präziser ausgedrückt, die Gewichtskraft G , ist das Produkt aus Masse und der örtlichen Erdbeschleunigungskraft: $G = m * g$

Für Präzisionsmessungen muss die örtliche Erdbeschleunigung g , abhängig vom Breitengrad und der exakten Höhe über NN, bestimmt werden. Der von der NASA verwendete Wert von $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$ gilt nur für Normalnull (NN).

Zurück zur Thematik der Volumenmessung. Ein schönes **Gedankenexperiment** zur Volumenbestimmung wurde durch folgende Geschichte bekannt:

Eine Dame fragte einen Wissenschaftler, ob er ihr sagen könnte, aus wie vielen Tropfen alle Ozeane (sie bilden immerhin 97% des Gesamtwasservorrates unseres Planeten, hinzukommen das Süßwasser und das Wasser in Eisform) unserer Erde bestünden.

Er nahm eine Pipette seiner Augentropfenflasche und sagte:

Hiermit bestimme ich das Volumen eines Tropfens (0,3ml). Sagen sie mir, wie viel Kubikmeter Wasser auf der Erde existiert und wir dividieren beide Werte (Gesamtvolumen durch das Volumen eines Tropfens). Natürlich wusste die Dame den Wert und nannte 1,4 Milliarden Kubikmeter = $1,4 * 10^{12} \text{ m}^3$

- $1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ l}$
- $0,3 \text{ ml} = 0,3 * 10^{-3} \text{ l} = 0,3 * 10^{-6} \text{ m}^3$
- Anzahl der Tropfen aller Ozeane: $n = \frac{1,4 * 10^{12} \text{ m}^3}{0,3 * 10^{-6} \text{ m}^3} = 4,67 * 10^{18}$

Wäre die Frage nach der Masse, also aus wie viel Kilogramm Wasser bestehen die Ozeane, dann müssten wir die Messtechnik bemühen und die Dichte (Salzkonzentration, Temperatur und Druck) des Wassers im Einzelnen bestimmen. Denn 1000 Liter Wasser wiegen nicht immer 1000kg!

2.1 Wichtige Größen der Fluidmechanik

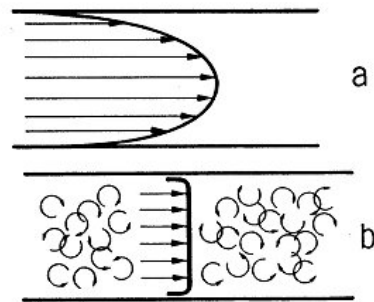
Die Wichte

Das spezifische Gewicht γ eines Körpers, auch Wichte genannt, ist das Verhältnis aus seiner Gewichtskraft G und seinem Volumen V , und somit eine Quotientengröße im Sinne von DIN 1313. Die DIN empfiehlt bereits seit 1938 im deutschen Normenwerk, den Ausdruck „spezifisches Gewicht“ zugunsten der Wichte aufzugeben.

Strömungsarten

- Die laminare Strömung

Es ist die Form, in der die Strömung in parallelen Schichten erfolgt. Es findet somit keine Durchmischung der Gas- bzw. Fluidteilchen statt. Der Wärmeaustausch zwischen den Schichten, bedingt durch die minimale Reibung der Moleküle ist gering. Die Reibung der Moleküle an den Rohrwänden ist höher, als innerhalb der Strömung, daher die nasenförmige Strömungsform.



Ergebnis: parabolisches Strömungsprofil (a) in der Rohrleitung

- Die turbulente Strömung

Bei der turbulenten Strömung haben wir eine Verwirbelung der Gas- bzw. Fluidteilchen. Es findet eine Durchmischung der Schichten statt. Die hohe Reibung der Moleküle führen zum Energieverlust (der „Verlust“ bezieht sich auf den ablaufenden Prozess).

Die laminare Strömung kann in eine turbulente Strömung umschlagen, wenn die kinetische Energie (m , v) der Urströmung erhöht wird oder die Reibung verringert wird. Theoretisch entspricht dies einer Erhöhung der Reynoldszahl Re .

Ergebnis: kolbenförmige Strömungsverteilung (je höher die Reynoldszahl, desto kolben- bzw. zylinderförmigere Form) – Strömungsprofil Fall (b)

Die Reynolds-Zahl

Die Reynolds-Zahl $Re = (\text{mittlere Strömungsgeschwindigkeit} * \text{Rohrdurchmesser}) / \text{kinematische Viskosität}$:

$$Re = \frac{v_{Average} * D}{\eta}$$

Die Größe $v_{Average}$ ist die mittlere Strömungsgeschwindigkeit bezogen auf eine charakteristische Länge z.B. dem Rohrdurchmesser.

Die Grenze zwischen einem laminaren und turbulenten Strömungsprofil wird in der Praxis bei etwa $Re = 2300$ angenommen. Unterhalb dieses Grenzwertes ist eine laminare Strömung vorhanden.

Ähnlichkeitssatz: Alle Strömungsverläufe sehen bei gleicher Reynoldszahl gleich aus.

Bedeutung für die Praxis: Das Strömungsverhalten an einem Körper kann mit der Realität verglichen werden, wenn z.B. das Modell 1:10 ist und gleichzeitig Fließgeschwindigkeit um den Faktor 10 vergrößert wird – bei gleicher Viskosität.

2.2 Volumenbestimmung und Volumenstrommessung

Bestimmung des Volumens für feste Körper

- a) geometrisch determiniert: $V=a*b*c$
- b) **nicht determinierbar** mit der klassischen Methode: $F_{\text{Auftrieb}} = V_{\text{Körper}} * \rho_{\text{Fluid}} * g$

Verfahren:

- Volumen oder Zählung? Falls das Stückvolumen bekannt ist, dann kann die Zählung (opto-elektronisch) zum Endergebnis führen.
- Volumenmessung für Schüttgut – kapazitiv messbar, indem das elektrisch nicht leitende Schüttgut als Dielektrikum betrachtet wird. Der Auffangbehälter ist ein überdimensionaler Kondensator, dessen Wände wie Kondensatorplatten betrachtet werden können. Lösung des Problems über die Aufgabe: Kondensator mit geschichtetem Dielektrikum.
- Wägung der Masse – über die bekannte Dichte das Volumen bestimmen (de facto möglich, jedoch wird oft der Wert der Masse benötigt)

Bestimmung des Volumens für Flüssigkeiten

- Messturbine – induktives Verfahren (Impuls pro Flügelradumdrehung)
- Wirkdruckverfahren – Verwendung von Blenden, Düsen und Venturirohr (~~V~~Verfahren)
- Ultraschallmessung (der Reinheitsgrad und die Temperatur des Mediums sind besonders wichtig)
- Wirbelzähler
- Magnetisch-Induktive-Durchflussmesser für Medien mit geringer elektrischer Leitfähigkeit

Bestimmung des Volumens für Gase

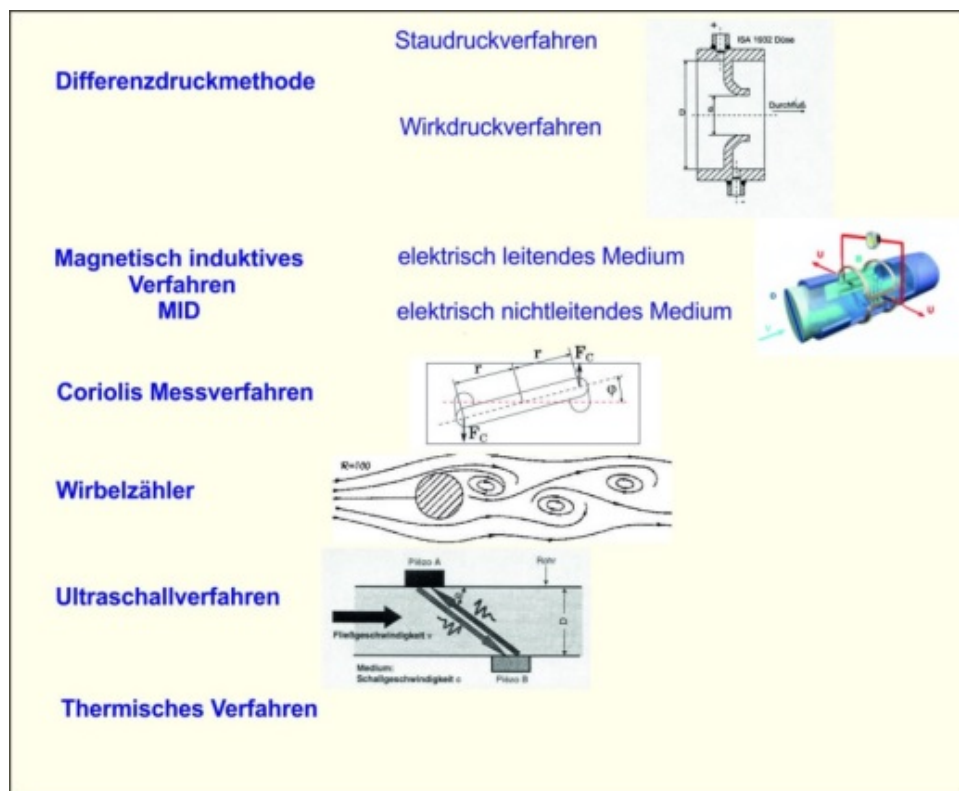
- Messturbine - induktives Verfahren (Impuls pro Flügelradumdrehung)
- Ultraschallmessung (der Reinheitsgrad und die Temperatur des Mediums sind besonders wichtig)
- Wirbelzähler
- Magnetisch-Induktive-Durchflussmesser für Medien mit geringer elektrischer Leitfähigkeit

Das Wirkdruckverfahren einzusetzen wäre prinzipiell auch möglich, es muss jedoch vor der Messung geprüft werden, ob die Druckdifferenz groß genug ist, um es sicher auswerten zu können. Ist womöglich das elektrische Signal sehr klein, so besteht die Gefahr, dass die Übertragung mittels Kabel das Signal zu stark dämpft und mit Rauschen vermischt.

Volumenstrommessung

Die Größe Volumenstrom $\dot{V} = \frac{dV}{dt}$ bezieht sich auf das transportierte Volumen dV des Mediums pro Zeiteinheit dt .

Möglichkeiten den Volumenstrom zu messen



2.3 Das Wirkdruckverfahren

Das Wirkdruckverfahren basiert auf der Messung des Volumenstroms mittels Differenzdruckverfahren an Blenden, Düsen bzw. Venturirohr. Ob eine Düse eingesetzt wird anstatt einer Blende, entscheidet die Wirkung des fließenden Mediums auf das Blendenmaterial. Hierbei ist die Fließgeschwindigkeit und der Anteil von Feststoffen im Fluid entscheidend. Ist die Abrasion am Öffnungsrand zu stark, so wird man sich für eine Düse, mit einem allmählichen fluiden Übergang, entscheiden.

Voraussetzungen für die Anwendung des Wirkdruckverfahrens:

- Fluid ohne Gaseinschlüsse, bzw. Gas ohne Tröpfchen
- Der Rohrquerschnitt muss voll ausgefüllt sein.
- stationäre Strömung – keine Pulsation des Mediums
- definiertes Strömungsprofil

Vorteile des Wirkdruckverfahrens:

- robust
- keine beweglichen Teile im Gas bzw. Fluid, daher einfacher Aufbau und wartungsfrei
- geeignet für extreme Bedingungen, wie Hochdruck bzw. Hochtemperatur
- Verschleißfreiheit
- hohe Lebensdauer
- keine mechanische Blockade des Rohrsystems, bei Ausfall eines Elements

Nachteile des Wirkdruckverfahrens:

- es entsteht ein Druckverlust, somit auch ein Energieverlust für den laufenden Prozess
- Ein- und Auslaufstrecken müssen eingeplant werden, wenn genügend Platz verfügbar ist
- bei akutem Platzmangel müssen Strömungsgleichrichter eingesetzt werden
- Messbereich oft durch die Konstruktion selbst eingeschränkt

Alternativen zum Wirkdruckverfahren:

- Messturbinen
- Wirbelzähler
- Ultraschallverfahren
- Massemesser

Der Vorteil der Wirkdruckelemente ist deren Robustheit. Bei falscher Auslegung können jedoch gravierende Fehlmessungen erfolgen, die zunächst nicht auffallen.

folgende Kriterien sind zu beachten:

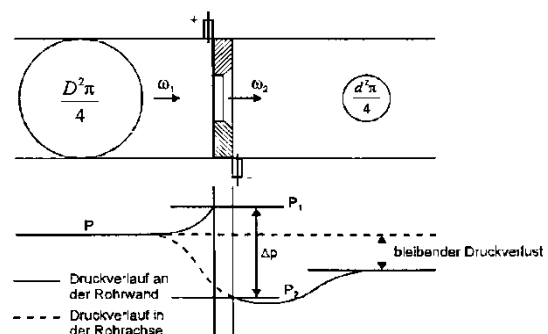
- Einläufe und Ausläufe richtig dimensionieren – Mindestlängen beachten oder Strömungsgleichrichter verwenden
- Schwingungen und Pulsationen in den Rohrleitungen vermeiden
- verschmutzte bzw. zweiphasige Medien vermeiden
- auf ausreichend hohen Wirkdruck achten (Kompromiss zum Energieverlust)
- abrupte Durchmesseränderungen vermeiden
- Rohre auf schlechte Rohr-Rauigkeit untersuchen
- horizontale Rohrführung bevorzugen
- Vermeidung von verdrehtem Einbau von Blenden

2.3.1 Messung des Volumenstroms mittels Blende

Das Verfahren beruht auf der Tatsache, dass durch eine Querschnittsänderung ein Druckunterschied entsteht. Dieser Differenzdruck (Wirkdruck) ist das Maß für den Durchfluss.

$$\dot{V} = q = K * \sqrt{\Delta p} \quad \text{Druckverläufe innerhalb der Leitung}$$

In einer geschlossenen Rohrleitung ist der Durchfluss in unterschiedlichen Querschnitten gleich. Der Stromfaden mittig im Rohr wird weder aufgestaut, noch hinter der Blende entspannt. An der Rohrinneiseite vor der Blende wird der Stromfaden aufgestaut, wir messen



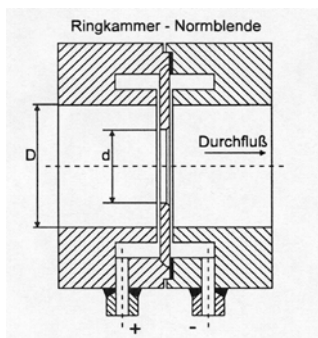
eine Drucküberhöhung in Relation zum nominalen Druck in der Rohrmitte. Da das Rohr kein Speicherelement ist, bildet sich am Blendenaustritt an der Rohrrinnenseite ein Druckminimum, da die Fluidmoleküle noch nicht durch die Blendenöffnung geflossen sind. Diese Druckdifferenz wird als Maß für den Volumendurchfluss genommen. Über einen empirisch gewonnenen Faktor K wird aus dem radizierten Differenzdruck der Volumenstrom bestimmt. In der Rohrmitte bleibt der Druck konstant.

$$q_m = A_{Rohr} * \rho_{Fluid} * v_{Fluid}$$

$$q_m = A_{Drossel} * \rho_{Fluid}^* * v_{Fluid}^*$$

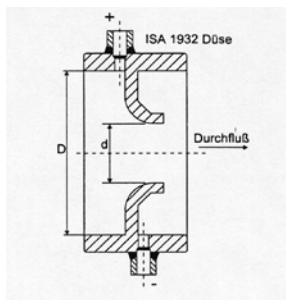
$$q_V = A_{Rohr} * v_{Fluid}$$

$$q_V = A_{Drossel} * v_{Fluid}^*$$



praktische Ausführung einer Blende

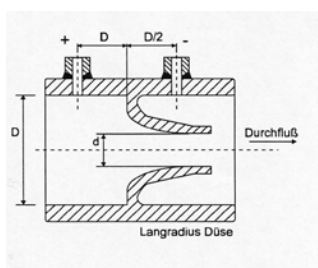
2.3.2 Messung des Volumenstroms mittels Düse



$$q_V = A_{Drossel} * \sqrt{\frac{2 * \Delta p}{\rho * (1 - m^2)}}$$

$$q_m = A_{Drossel} * \sqrt{\frac{2 * \rho * \Delta p}{(1 - m^2)}}$$

Bedingungen bzw. Verwendungshinweise:



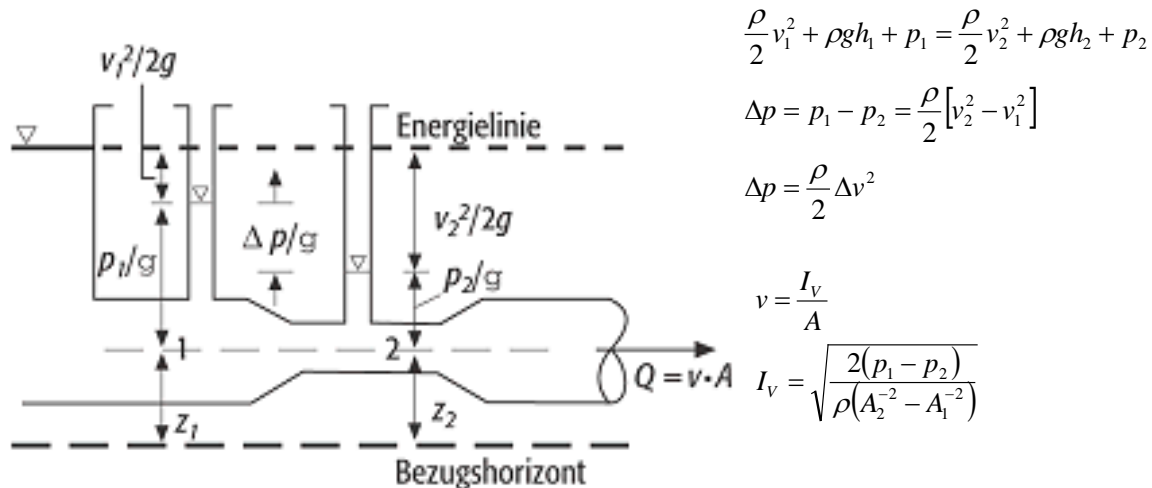
waagerechter Einbau

- Fluide werden als inkompressible Medien betrachtet
- konstante Dichte wird vorausgesetzt
- Strömung sollte stationär sein

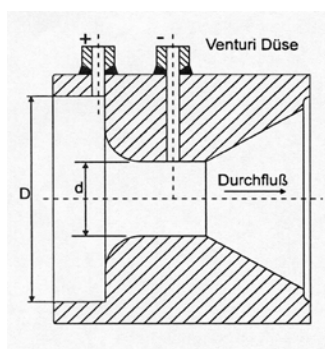
konstruktiver Parameter: Öffnungsverhältnis $m = \frac{A * d}{A * D}$

2.3.3 Messung des Volumenstroms mittels Venturirohr

Dieses Verfahren ist eine nach dem italienischen Physiker G.B. Venturi benannte Messanordnung zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeiten von Flüssigkeiten.

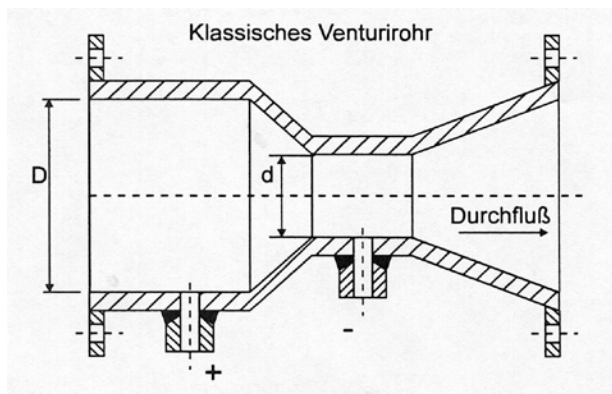


Venturi-Rohr und die Bernoulli'sche Energiegleichung für den waagerechten Einbau ($\Delta h = 0$)



Ein Venturi-Rohr besteht aus miteinander verbundenen Durchflussröhren verschiedener Querschnitte, auf denen Standrohre zur Messung der Druckhöhe angebracht sind. Aus der Grundbedingung, dass an allen Punkten die Energiehöhe gleich ist, die sich unmittelbar aus der Bernoullischen Energiegleichung ergibt, lässt sich bei bekannten Strömungsquerschnitten und abgelesenen Druckhöhen die Durchflussgeschwindigkeit der strömenden Flüssigkeit berechnen.

Da es in der Realität kaum reibungsfreie Strömungen gibt und die konstante Geschwindigkeit über den gesamten Querschnitt eine Idealisierung darstellt, müssen praxisnahe Formeln (empirischer Beiwert α) angewendet werden. Der empirische Beiwert berücksichtigt auch die Art des Drosselgerätes.



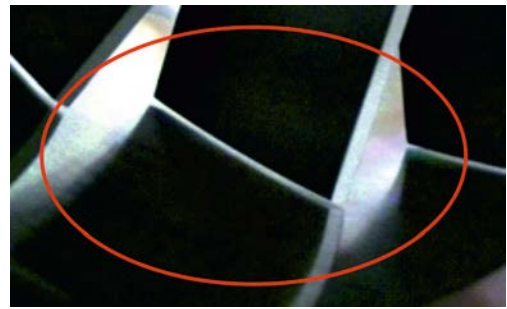
$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{1 - m^2}}$$

$$q_m = \alpha \cdot A_{Drossel} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p}$$

$$q_m = \alpha \cdot d^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p}$$

2.4 Durchflussmessung mittel Messturbine

Eine Messturbine besteht idealerweise aus einem ferromagnetischen und massehomogenen Messturbinenschaufelrad. Die Fertigungsgenauigkeit ist technisch begrenzt. Die Positionen der einzelnen Messturbinenschaukeln können nicht exakt ausgerichtet sein, gewisse Toleranzen müssen akzeptiert werden. Diesen wichtigen Fakt müssen wir in der Messtechnik stets bedenken, da diese Fertigungstoleranzen, bei direkter Messung der Pulse pro Umdrehung, in die Messfehlerberechnung mit eingehen. Die homogene Masse des Messturbinenschaukelrades ist notwendig, da mögliche Unwuchten zur Berührungen mit der Rohrinne-



wand führen können. Zu großer Spielraum zwischen Rohrinne- und der äußersten Kante einer Schaufel führt zu parasitären Durchflusseffekten. Dieser fehlende Durchfluss kann und wird durch die Messturbine nicht gemessen.

Ferner wird ein Strömungsgleichrichter benötigt und ein, in unmittelbarer elektrischer Nähe, jedoch außerhalb des strömenden Medienbereichs, Sensor, der erfassen kann, ob eine Turbinenschaukel in der Nähe des Sensors ist oder nicht. Ist aus Kostengründen das Messturbinenschaukelrad aus Kunststoff oder anderen diamagnetischen Werkstoffen, so müssen in die Turbinenschaukeln Miniaturferrite eingelassen werden. Diese zusätzlichen Massen produzieren jedoch eine Unwucht. Bei hohen Drehzahlen wirken die Kräfte zerstörend, besonders dramatisch wirkt es sich auf die Lager aus. Die Lagerung darf keine unnötige Reibung aufweisen. Nur bei Minimalreibung können auch schwache Strömungen und leichte Medien die Masseträgheit der Messvorrichtung überwinden. Vorsicht ist bei Messturbinenprobeläufen geboten. Aus messtechnischer Sicht ist die Überprüfung der elektrischen Funktionsweise notwendig. Es ist nicht notwendig das Originalmedium fließen zu lassen, eine „upstream“-Bedrückung z.B. mit Stickstoffgas setzt die Messturbine auch in Bewegung. Die Lager der Messturbine sind jedoch so ausgerichtet, dass sie durch das Originalmedium gekühlt werden. Wird dies nicht beachtet, kann es bei solchen unnötig langen Probeläufen zur Lagerüberhitzung kommen.

Entsprechend der Strömungsrichtung sind die Messturbinenschaukeln vorausgerichtet. Die Messturbinen messen, auf der Basis des induktiven Messprinzips, einen Volumenstrom. Um einen Massenstrom zu bestimmen, werden an gleicher Position immer eine Temperatur und ein Druck gemessen. Die Berechnung der Dichte erfolgt im Rechner durch eine Echtzeitsoftware, damit zeitsynchron der aktuelle Wert des Massestroms bestimmt werden kann. Die Messturbinen müssen bei kryogenen Medien vakuumisoliert sein, damit kein parasitärer Wärmeübergang von außen stattfinden kann. Eine externe Erwärmung des Mediums führt unweigerlich zur Verdampfung des Mediums innerhalb des Rohres. Dieser Gasbläscheneinschluss verfälscht nicht nur die Messergebnisse, sondern führt unter Umständen zu Kavitationsproblemen an rotierenden Strömungsmaschinen. Kavitation ist eine äußerst unerwünschte Erscheinung in schnell strömenden Flüssigkeiten. An Orten hoher Umströmungsgeschwindigkeit werden durch lokale Druckabsenkung mit Dampf gefüllte Hohlräume gebildet, die in Gebieten wieder ansteigenden Druckes in sich zusammenfallen. Gerade kryogene Medien, wie flüssigem Wasserstoff und Sauerstoff, sind für Verdampfungserscheinungen, bedingt durch ihre tiefen Betriebstemperaturen, anfällig. In der Raketentechnik führt Kavitation zu einer unregelmäßigen Verbrennung in der Brennkammer

und zu Schäden an Turbopumpen. Turbopumpen müssen bei Raketentriebwerken große Treibstoffmengen („Vulcain 2“ Hauptstufe der Ariane 5 mit einem Brennkammermassedurchsatz von $\dot{m}/dt > 306 \text{ kg/s}$) mit hohem Druck fördern und sind daher besonders anfällig für Kavitation.



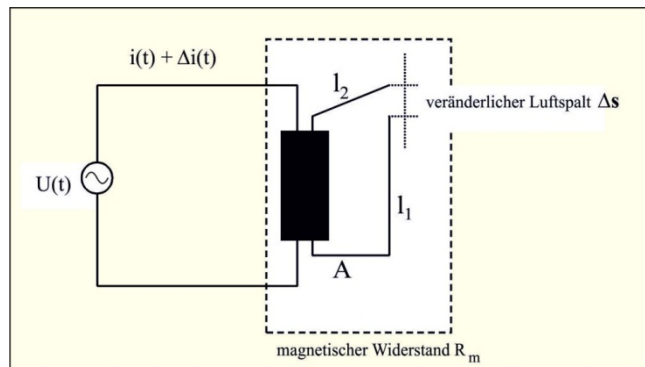
Montage einer Messturbine am Prüfstand P5 im Bereich LH2

Durch die Verwendung von Turbinenschaufeln ist es nicht gleichgültig, wie die Messturbine eingebaut wird. Die Strömungsrichtung ist zu beachten. Die Rotation der Messturbine verändert eine laminare Strömung in eine turbulente. Sind die Entfernungen zur nächsten Baugruppe (Druckaufnehmer, weitere Durchflussmesser, Turbopumpeneintritt) nicht groß genug, müssen Strömungsgleichrichter eingesetzt werden. Es ist zu empfehlen auch im Einlauf einen Gleichrichter einzubauen. Im Falle, dass turbulente Strömungen in den Messturbinenbereich einfallen, könnte es zu Unwuchterscheinungen kommen. Diese mechanischen Belastungen beanspruchen unnötig den Durchflussmesser und führen natürlich auch zu kurzzeitigen Fehlmessungen, bedingt durch die Masseträgheit des Turbinenschaufelrades. Jede Verwirbelung erzeugt Druckmaxima und -minima, was speziell bei einer notwendigen Druckmessung zu falschen Messwerten führt. Die Druckmessung muss daher in einer laminaren und homogenen Strömung erfolgen. Es ist auch darauf zu achten, wie der Temperaturobnehmer platziert wird. Auch schlecht platzierte Aufnehmer, in der Regel direkt vor, im unmittelbaren Bereich des Druckaufnehmers, verursachen Turbulenzen und „zerstören“ das Messsignal.



Turbinenschaufeln als Impulsgeber

Nach dem induktiven Prinzip erzeugt jeder Turbinenschaufelvorbeilauf einen elektrischen Impuls, da der magnetische Widerstand innerhalb des magnetischen Kreises durch die Luftspalte Δs verändert wird. Betrachten wir die abstrakte Schaltungsanordnung:



Speisespannung des magnetischen Kreises:
 $U(t) = \hat{U} \sin(\omega t)$

Der Stromfluss im magnetischen Kreis: $i(t) = \hat{I} \sin(\omega t)$

magnetischer Widerstand: $R_{mag} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta s}{A}$

Der magnetische Widerstand, der durch den Luftspalt verursacht wird, ist wesentlich höher, als der magnetische Reihenwiderstand des ferromagnetischen Materials; in der Skizze mit den Anschlüssen I_1 und I_2 gekennzeichnet. Für den Betrag der induzierten Spannung u gilt allgemein:

$$|u| = n \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\Phi(t) = \frac{n}{R_{mag}} i(t)$$

$$u = n \frac{n}{R_{mag}} \frac{d}{dt} i(t) = n^2 \mu \frac{A}{l} \frac{di(t)}{dt} = L \frac{di(t)}{dt}$$

Die Größe u ist unsere Energiequelle, die Größe L ist unsere Veränderliche und der Strom i unser Messsignal:

$$i(t) = \frac{1}{L} \int u dt = \frac{1}{L} \int \hat{U} \sin(\omega t) dt$$

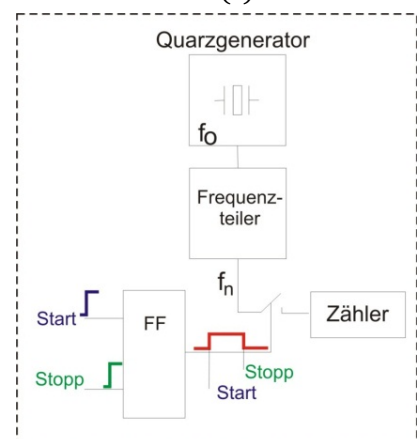
$$i(t) = -\frac{1}{\omega L} \hat{U} \cos(\omega t) = \frac{1}{\omega L} \hat{U} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

Durch Veränderung des Luftspalts, verändert sich die Gleichstrominduktivität: $\hat{I}(t) + \Delta \hat{I} =$

$$\frac{U}{\omega(L + \Delta L)}$$

Der Stromfluss wird durch den veränderlichen induktiven Widerstand $x_L = \omega L$ bestimmt. Die Frequenz der Speisespannung ist konstant, aber der Wert der Gleichstrominduktivität ist veränderlich.

Unabhängig von der Drehrichtung und der Geschwindigkeit der Turbinenschaufeln, wird das elektrische Signal erzeugt. Beim elektro-dynamischen Prinzip ist die Signalamplitude auch von der Bewegungsgeschwindigkeit des Leiters im magnetischen Feld



abhängig, was bei kleinen Durchflüssen kleine Drehgeschwindigkeiten und somit kleine Signale generieren würde. Problematisch wird das Messverfahren, wenn jeder Impuls pro Turbinenschaufel direkt gezählt wird und aus der Summe pro Minute die Umdrehungszahl (und mittels Koeffizienten) der Volumendurchfluss bestimmt wird. Wird in einem stets konstanten Zeitfenster (Sekunde oder Minute) die Anzahl der Impulse gezählt, so kann im ungünstigen Fall der Zählvorgang genau vor dem letzten Impuls beendet werden.

Bei 16 Turbinenschaufeln bedeutet dies, dass statt 16 nur 15 Impulse pro Umdrehung gezählt werden. Der resultierende Fehler bei kleinen Durchflüssen wäre enorm – in diesem Fall: 6,25%. Die direkte Zählung ist nicht akzeptabel, da die Genauigkeit von der Drehzahl abhängig wäre. Aus diesem Grund wird oft ein anderes Verfahren eingesetzt. Die Anzahl der Impulse wird, in Abhängigkeit der Umdrehungsgeschwindigkeit, indirekt aufsummiert. Ein hochfrequenter Oszillator produziert Impulse. Der erste von der Turbinenschaufel induzierte Impuls öffnet ein Tor und ein Zähler beginnt mit der Zählung der Oszillatorimpulse.

Der zweite induzierte Impuls der folgenden Turbinenschaufel schließt das Tor. Die aufsummierten, hochfrequenten Impulse des Oszillators sind ein Maß für die Umdrehung pro Zeiteinheit. Dieser Vorgang wiederholt sich 8 mal pro vollständiger Umdrehung der Messturbinen. Der Wert der acht Zählungen kann gemittelt werden. Die Genauigkeit der Position der Turbinenschaufeln unterliegt einer vernünftigen Fertigungstoleranz. Durch die resultierende Ungenauigkeit der Schaufelpositionen, werden mal mehr oder weniger hochfrequenter Oszillatorimpulse, bei konstanter Umdrehung der Messturbinen, erfasst. Die Torzeit differiert bzw. streut dadurch. Diese Streuung der Torzeit erzeugt letztendlich eine scheinbare Durchflussänderung. Wir erhalten ein pro Schaufelabstand sich änderndes Messsignal.

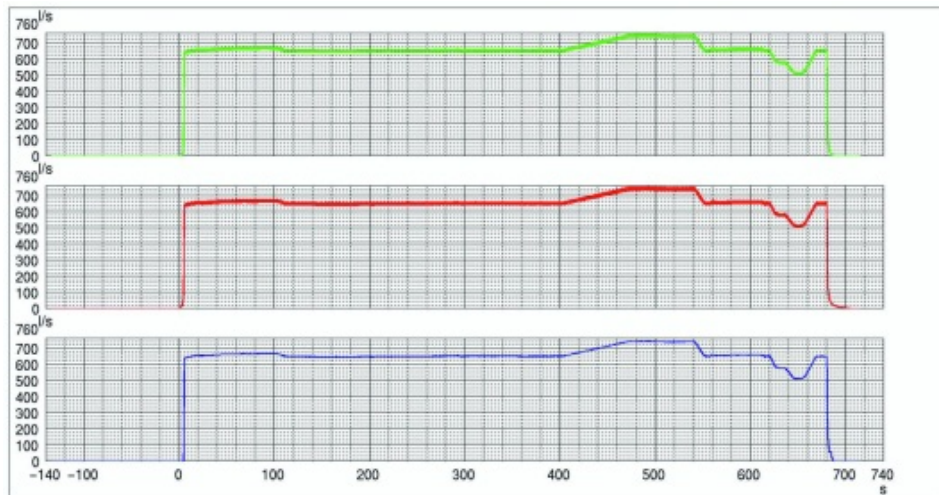


Drei Durchflussmesser in einer LH2-Leitung

In der Praxis wurden drei Durchflussmesser (Messstellenbezeichnung: QHP1, QHP2 und QHP3) analysiert. Diese Durchflussmesser sind Teil der LH2-Fahrleitung des Prüfstandes P5, beim DLR in Lampoldshausen. An diesem Prüfstand werden die Haupttriebwerke der Ariane 5 getestet.

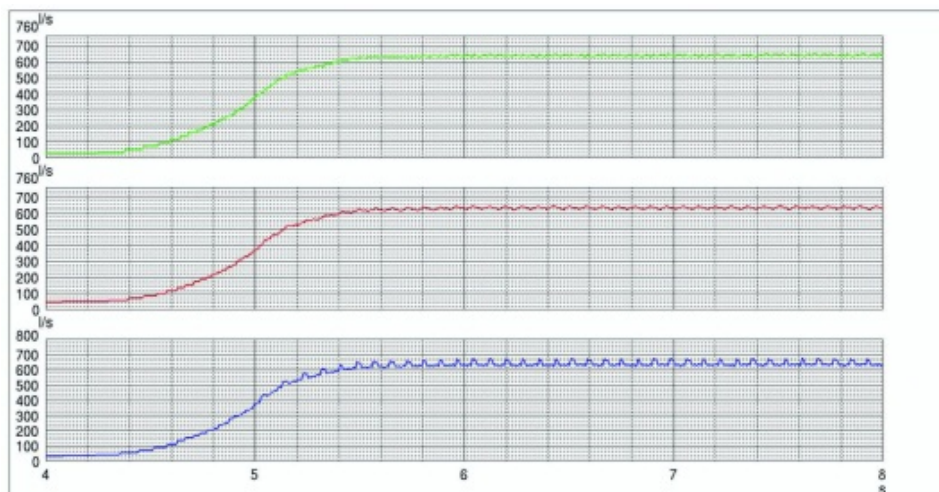


Der nominale Durchfluss beträgt 600-800 l/s. Für die Triebwerksregelung werden drei Durchflussmesser benötigt, um den geforderten Genauigkeiten nachzukommen. Pro Durchflussmesser werden an zwei verschiedenen Positionen die Impulse (QHP1 und QHP12) erfasst und unmittelbar in ein elektrisch-transportables Signal umgeformt. Der Zählprozess erfolgt in 500m Entfernung auf einem speziellen Elektronikbort in der unmittelbaren Nähe der Echtzeitrechenanlage.



Messsignale der drei Durchflussmesser QHP1, QHP2 und QHP3

In diesem Diagramm sind die primären Messstellen an den drei Durchflussmessern dargestellt. Deutlich erkennbar sind die unterschiedlichen Strichstärken der Diagramme, was auf eine unterschiedliche Streuung der erfassten Messsignale hindeutet. Die Ursache der Streuung liegt nicht im elektrischen Signalrauschen, sondern in den streuenden Ergebnissen, bedingt durch die differierenden Torzeiten. Dieser Umstand ist ärgerlich, jedoch würden die Fertigungskosten solcher Messturbinen sehr hoch sein, wenn man die Fertigungstoleranzen um eine 10er Potenz verbessert. Hier muss über eine elektronische Kompensation der Störsignale nachgedacht werden.

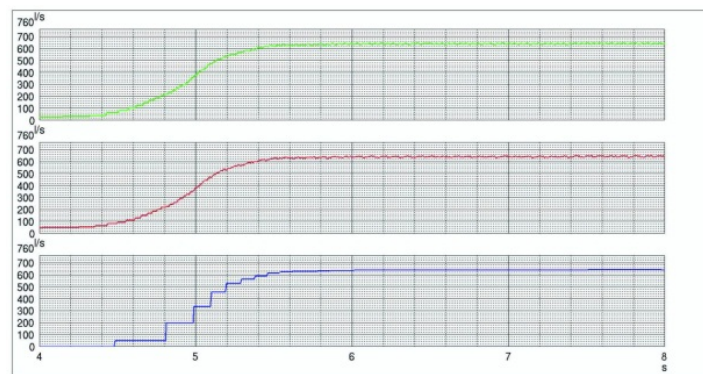


Die gleichen Messstellen im Bereich des Hochlaufs

Innerhalb von zwei Sekunden wird ein Durchfluss von über 600l/s gemessen. Hierbei sieht man deutlich das scheinbar gestörte Messsignal, hervorgerufen durch die Fertigungstoleranzen der

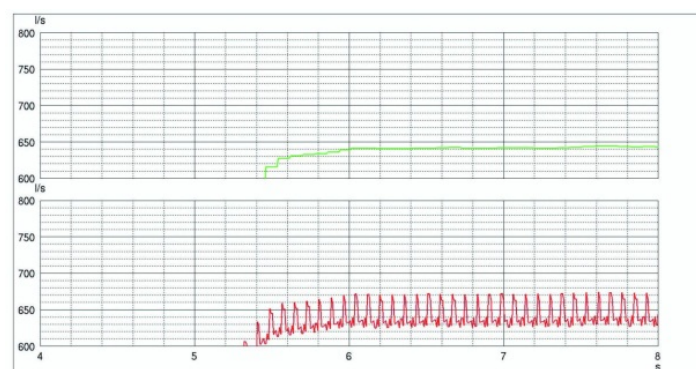
Turbinenschaufeln. Die Zeiten zwischen Start und Stopp der Torschaltung und somit die Aufsummierung der hochfrequenten Oszillatorimpulse differiert. Für Regelungsprozesse ist die direkte Weiterverarbeitung solcher Messsignale nicht akzeptabel. Es müssen in einer Software fließende Mittelwerte gebildet werden, was natürlich den Regelungsprozess unter Umständen langsamer macht. Der Vorteil einer softwaremäßigen Signalkompensation liegt in der dynamischen Anpassung an die praktische Anforderung im Betrieb. Der Operateur kann entsprechend des Betriebszustandes schnelle oder langsame Algorithmen starten und stoppen, so dass der zu regelnde Prozess nicht wesentlich beeinträchtigt wird.

Eine Alternative zur Bereinigung des Messsignals ist der Einsatz von Frequenzteilern. Letztendlich wird nicht jeder Start-Stopp-Vorgang ausgewertet, sondern wahlweise ein Teil davon. Gehen wir davon aus, dass bei 16 Turbinenschaufeln maximal acht Zählvorgänge pro vollständigem Messsturbinenumlauf möglich sind, dann wird durch den Einbau eines Teiler mit dem Divisor „8“, die Zählung (Messwertbestimmung) auf einen Vorgang reduziert.



Der Parameter QHP3 - blaue Linie - wurde mit einem Frequenzteiler erfasst.

Während des Durchflusshochlaufs ist diese Messkonfiguration mit einem Frequenzteiler für Regelungsprozesse oft ungeeignet, wenn die Regelgröße durch den Durchfluss direkt oder indirekt bestimmt wird. Die Verzögerung der Messwerte, die in den Regelzyklus mit eingehen, ist zu hoch. Hier empfiehlt es sich den Frequenzteilerfaktor „4“ oder „2“ zu wählen. Da der Teilerfaktor hardwaremäßig erfolgt, ist eine dynamische Faktorenumschtaltung zwischen den Versuchs-, Betriebs- und Messphasen nicht möglich. Im quasi-stationären Betriebsfall ist die Signalbereinigung durch den Einsatz von Frequenzteilern eine Alternative.



Signalverbesserung (grüne Linie) durch Einsatz eines Frequenzteilers

Ohne Teiler haben wir - bedingt durch die achtfache Messung pro vollständiger Messturbinenumdrehung - ein „Signalrauschen“ von 40l/s, was einem relativen Fehler - bei 640l/s als Referenzwert – von 6,25% entspricht.

2.5 Wirbelzähler Durchflussmesser

Dieses Messprinzip beruht auf der Beobachtung, dass sich nach Hindernissen in einer Strömung Wirbel ausbilden. Dementsprechend arbeiten Wirbelzähler nach dem Prinzip der Karman'schen Wirbelstraße. Hinter einem angeströmten Staukörper im Messrohr bilden sich abwechselnd Wirbel, welche durch die Strömung abgelöst werden.



Wirbelstraße

Die Frequenz der Wirbelablösung zu beiden Seiten des Staukörpers ist direkt proportional zur mittleren Fließgeschwindigkeit und damit zum Volumendurchfluss. Die hinter dem Staukörper abgelösten Wirbel erzeugen abwechselungsweise einen lokalen Unterdruck im Messrohr, der durch einen kapazitiven Sensor erfasst wird.

Das Messsignal unterliegt keiner Drift. Deshalb können Wirbelzähler über die gesamte Lebensdauer ohne Nachkalibrierung eingesetzt werden.

Vorteile:

- universell einsetzbar für die Messung in Flüssigkeiten, Gasen und im Dampf
- unabhängig gegenüber Druck-, Temperatur- und Viskositätsänderungen
- hohe Langzeitstabilität
- keine Nullpunktdrift
- keine beweglichen Teile, somit verschleißfrei
- geringer Druckverlust
- einfache Installation und Inbetriebnahme wird von den Herstellern garantiert
- Große Messdynamik; typische Verhältnisse von 10:1 bis 30:1 bei Gas oder Dampf bzw. bis 40:1 bei Flüssigkeiten
- im Temperaturbereich von -200...+400 °C einsetzbar

2.6 Magnetisch-induktive Durchflussmessung - MID

Ein Beispiel aus der Natur

Es soll die Strömungsgeschwindigkeit eines 300m breiten Flusses gemessen werden.

Die Leitfähigkeit des Wassers beträgt: $S = 5 \frac{S}{m}$

An den Uferseiten werden parallel zueinander jeweils eine elektrisch leitende Elektrode mit der Höhe $h = 2\text{m}$ und einer Länge von $l = 10\text{m}$ montiert.

Beide Elektroden sind immer im Wasser. Wir haben die Anordnung eines Strömungswiderstandes im magnetischen Feld.

Die magnetische Flussdichte an diesem Ort [abhängig vom Breiten- und Längengrad] beträgt $B = 50\mu\text{T}$. Es wird eine induzierte Spannung u von $u = 41,6\text{ mV}$ gemessen.

Wie groß ist in km/h die Strömungsgeschwindigkeit des Flusses?

Lösung:

allgemein gilt für die Bewegungsinduktion: $E_{ind} = \vec{v} \times \vec{B}$

Was ist Spannung? Es ist die Potentialdifferenz zwischen den Ortspunkten A und B, wenn eine elektrische Feldstärke E vektoriell über den Weg s wirkt: $u_{A \rightarrow B} = \varphi_A - \varphi_B = \int_A^B \vec{E} d\vec{s}$

Für unser Experiment gilt, weil die Größen v , B und L orthogonal zueinander stehen:

$$u = \int_0^L (\vec{v} \times \vec{B}) d\vec{s} = vBL$$

vektoriell gesehen gilt: $u = \int_0^L (v e_x \times B e_y) e_z ds$

Wir setzen die gegebenen Zahlen ein:

$$v = \frac{u}{BL} = \frac{41,6 \cdot 10^{-3} \text{V}}{50 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{m}} \cdot 300 \text{m}}$$

$$v = \frac{41,6}{50 \cdot 3} \frac{10^{-3} \text{V} \text{m}^2}{10^{-4} \text{V} \frac{\text{m}}{\text{s}}} \frac{1}{\text{m}}$$

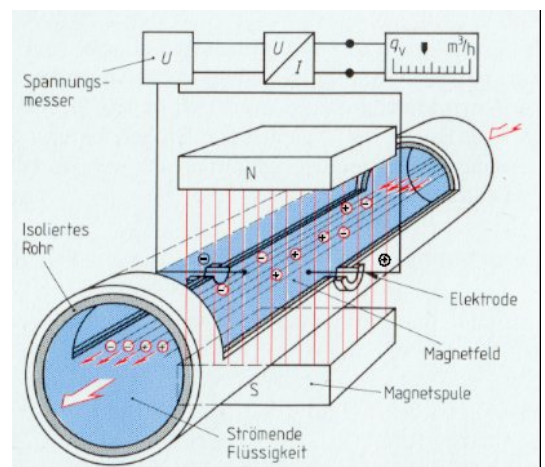
$$v = 2,773 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 2,773 \frac{10^{-3} \text{km}}{\frac{1}{3600} \text{h}}$$

$$v = 2,773 \cdot 3,6 \frac{\text{km}}{\text{h}} \approx 9,9828 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Die magnetisch-induktive-Durchflussmessung funktioniert nach dem gleichen Prinzip. Es wird ein statisches Magnetfeld aufgebaut und orthogonal zur Strömungsrichtung platziert. Die induzierte Spannung des ferromagnetischen Mediums wird entsprechend 90° zur Strömungsrichtung und zum Magnetfeld versetzt gemessen.

Der MID Aufnehmer

Ein magnetisch-induktiver Durchflussmesser (MID) besteht aus einem Messrohrelement aus Metall, welches von einem elektrisch-leitfähigen Medium durchflossen wird. Dieses Messrohrelement wird von einem Magnetfeld durchsetzt, in dem sich zwei gegenüberliegend, quer zum Magnetfeld angeordneten Messelekt-



roden befinden. Die Erfassung der induktiv erzeugten Messspannung an den Messelektroden, erfolgt um 90° versetzt zur Magnetfeldrichtung.

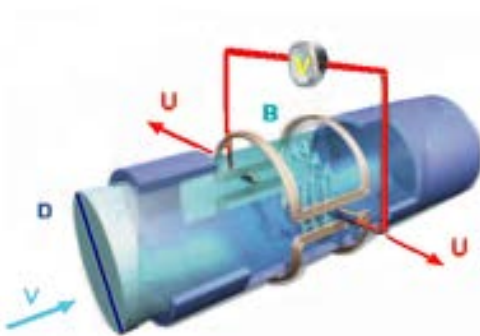
Vorteile

- das Messprinzip ist unabhängig von Druck, Dichte, Temperatur und Viskosität
- hohe Messsignaldynamik
- keine beweglichen Teile, daher verschleißfrei
- keine Druckverluste
- keine störenden Einbauten, damit keine Strömungsprofiländerung
- Lineares Ausgangssignal
- auch für aggressive und korrosive Medien verwendbar
- Kein Einfluss der Leitfähigkeit, wenn sie größer $5 \mu\text{S}/\text{cm}$
- gute Messgenauigkeit auch unter Feststoffbelastung und bei Gaseinschlüssen
- gute Reproduzierbarkeit und Langzeitstabilität
- minimaler Wartungsaufwand

Nachteile

- Forderung nach einer Mindestleitfähigkeit des Mediums
- Maximale Messstofftemperatur bei etwa 200°C
- Mindestfließgeschwindigkeit bei etwa $0,5 \text{ m/s}$
- Neigt im Rohrbereich zu Ungenauigkeiten, da Eisenablagerungen den Nennquerschnitt verringern

Einsatz der MID-Technik im gefüllten Rohr



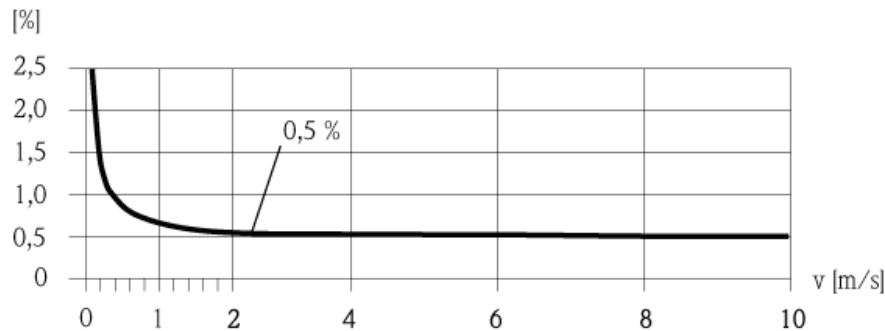
In der industriellen Messtechnik muss unterschieden werden, ob das Rohr vollständig gefüllt ist oder nicht. Der Magnetisch-induktiver Durchflussmesser besteht aus einem diamagnetischen Messrohr. Durch dieses Messrohr strömt der statische magnetische Fluss und durchströmt senkrecht zur Rohrachse das fließende Medium. Das Medium muss elektrisch leitfähig sein, denn das fließende Medium ist der sich bewegende elektrische Leiter im stationären Magnetfeld.

Für ein theoretisches Modell mit unendlich langem Magnetfeld und unendlich kleinen punktförmigen Elektroden wurde festgestellt, dass die gemessene induzierte Spannung unabhängig vom Strömungsprofil im Messrohr ist. Dies gilt nur unter der Annahme, dass das Strömungsprofil radialsymmetrisch sein muss.

Eigenschaften von MID für vollständig gefüllte Rohrleitungen:

- freier Rohrquerschnitt, daher auch geeignet für Medien mit Feststoffanteilen
- Nennweite identisch zum Prozessrohr
- verschleißfrei, da keine mechanisch bewegten Teile vorhanden sind
- langlebig

- überlastsicher
- keine Anlaufschwelle (einstellbar: Schlemm-Mengen-Unterdrückung)
- unabhängig von Viskosität und Dichte
- Messung in beiden Durchflussrichtungen möglich
- hohe Genauigkeit, linearer Zusammenhang zwischen Durchfluss und der Signalspannung

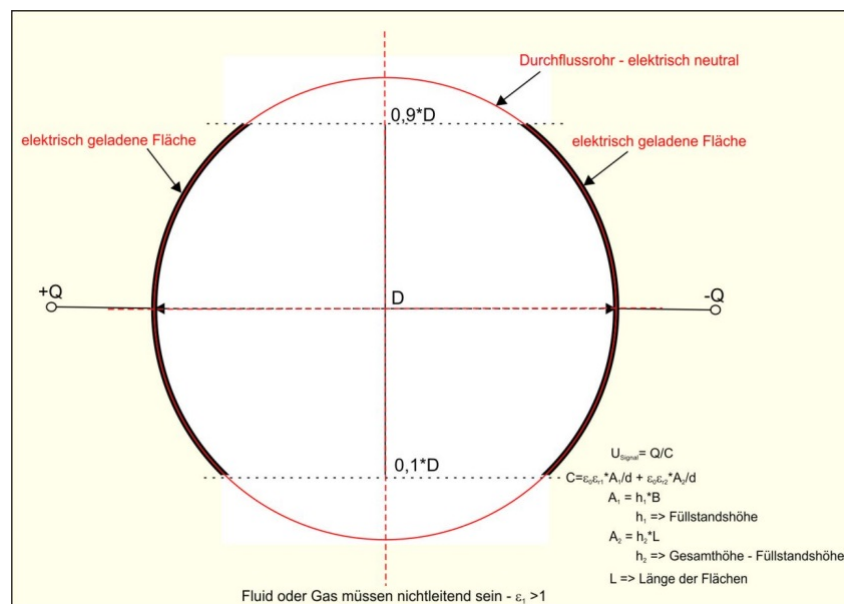


maximaler relativer Fehler in Prozent für ein „Endress und Hauser“ Produkt

Einsatz der MID-Technik im teilgefüllten Rohr

Kann nicht immer garantiert werden, dass die Rohrleitung vollständig gefüllt ist, so wird die Füllstandhöhe kapazitiv gemessen. Im Rohr, mit dem Innendurchmesser D , werden zwei Elektrodenflächen eingebettet, die in der Rohrsohle bei $0,1 \cdot D$ und in der Höhe von $0,9 \cdot D$ elektrisch getrennt sind. Das Medium darf nicht elektrisch leitfähig sein! Die Füllhöhe wird, wie bei einem Kondensator mit vertikal geschichtetem Dielektrikum, bestimmt.

- Die Strömungsgeschwindigkeit wird magnetisch-induktiv gemessen.
- Die Füllhöhe des Rohres wird kapazitiv gemessen.
- Aus der Höhe wird der Strömungsquerschnitt berechnet.



Die Länge L der Kondensatorplatten ist gegeben. Die Bestimmung der Gesamthöhe h ergibt sich aus dem Kreisumfang $u = 2\pi \frac{D}{2} = \pi D$ minus der beiden Bogenlängen $b = \frac{D}{2} \pi \frac{\alpha}{180^\circ}$ an der Ober- und Unterseite des Rohrquerschnittes (Kreisfläche). Wobei der Winkel α sich aus folgenden Größen bestimmen lässt:

$$\begin{aligned}\alpha &= 2 * \arccos \left[1 - \frac{h}{r} \right] = 73,74^\circ \\ b &= D * 0,6435 \\ \text{Flächenhöhe } h &= \frac{1}{2} [\pi D - 2 * b] = \left[\frac{D}{2} \right] * K \\ K &= \pi - 2 * 0,6435 = 1,8546\end{aligned}$$

Der Plattenabstand d , entspricht in der Bemessungsgleichung für den Kondensator der Länge der elektrischen Feldlinien, ist eine Funktion des Rohrradius und kann nur in einer guten Näherung bestimmt werden. Die Ursache liegt im Feldlinienverlauf beim unmittelbaren Aus- und Eintritt in die Kondensatorflächen. Die Feldlinien treten orthogonal aus den Plattenflächen heraus und sind für jede gedachte Feldlinie etwas länger als die exakte lineare Verbindung zum Gegenpol. Beim Eintritt in die Kondensatorfläche ist das gleiche Verhalten zu beobachten.

Mit der Strömungsgeschwindigkeit und dem Strömungsquerschnitt wird der Volumendurchfluss ermittelt: $\dot{V} = q = v * A$. Wobei A aus dem Kreissegment zwischen $0,1 * D$ und $0,9 * D$ berechnet wird.

Erdung des MID

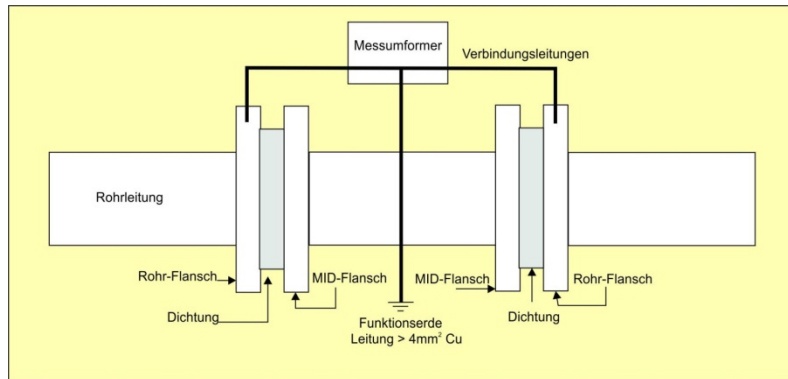
Die Signalspannung des MID liegt im Bereich von einigen Millivolt. Eine Signalverstärkung unmittelbar am Messort, ist oft nicht möglich. Die Signalübertragung über mehreren 100 Metern kann nur störungsfrei stattfinden, wenn die Messspannung ein festes und elektrisch sauberes Potenzial besitzt. Unter Laborbedingungen ist es oft kein Problem, da sich die technischen Aufbauten konzentriert auf wenige Quadratmeter und innerhalb eines Gebäudes beschränken. Bei komplexen technischen Großanlagen sind Entfernungen von mehreren 100 Metern keine Seltenheit. Das Erdpotential differiert, denn der Leitwert unserer Erde ist nicht an jedem Punkt gleich und konvergiert auch nicht idealerweise gegen unendlich.

Selbst elektrische Verbindungen mit großen Querschnitten (und somit mit sehr kleinen ohmschen Widerständen) können nicht ohne eine Potenzialdifferenz zu erzeugen, zwei weit entfernte Punkte ideal elektrisch ausgleichen. Jeder elektrische Leiter hat einen endlichen ohmschen Widerstand. Ein Potenzialgefälle über einen ohmschen Widerstand lässt einen Strom fließen. Über jeden stromdurchflossenen ohmschen Widerstand fällt eine Spannung ab. Somit überlagert sich unserem Messsignal eine elektrische Komponente, die störend ist.

Jede Störung unseres Signals ist eine Verfälschung unseres Messergebnisses und verändert den ablaufenden Prozess. Selbst über die Medien wird die elektrische Ladung übertragen. Hierbei muss dann unterschieden werden, ob wir ein elektrisches Strömungsfeld haben oder eine kapazitive Feldstärkebildung, die wie ein Kondensator auf unseren messtechnischen Aufbau wirkt.

Erdung in innen elektrisch leitfähigen Rohrleitungen

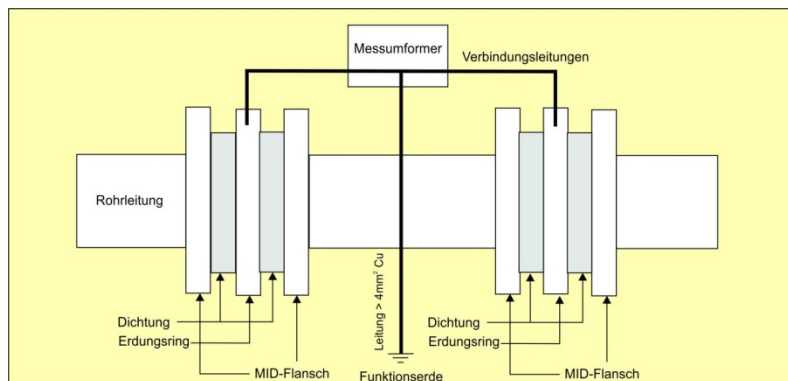
Der MID wird mit der Rohrleitung im Sinne eines Potentialausgleichs elektrisch verbunden. Die Rohrleitung ist geerdet, das fließende Medium und damit auch indirekt die Signalspannung, besitzt ein festes Bezugspotenzial.



Erdung von elektrisch nichtisolierten Elementen

Erdung in innen elektrisch isolierten Rohrleitungen

Bei Kunststoffleitungen, die innen isoliert ausgekleidet oder beschichtet sind, muss das fließende Medium durch spezielle Maßnahmen geerdet werden. Dazu werden Metallerdungsringe verwendet, deren Innenseite mit dem Medium in Kontakt steht. Die zwischen Rohrleitungs- und MID-Flansche montierten Erdungsringe sind einzeln auf einer gemeinsamen Potenzialschiene geerdet. Die Erdung des Messstoffs kann auch durch zusätzliche Erdelektroden im MID erreicht werden. Bei dieser Variante müssen mögliche spürbare Potenzialunterschiede innerhalb der Gesamtanlage vermieden werden, sonst droht eine elektrolytische Zerstörung des MID.



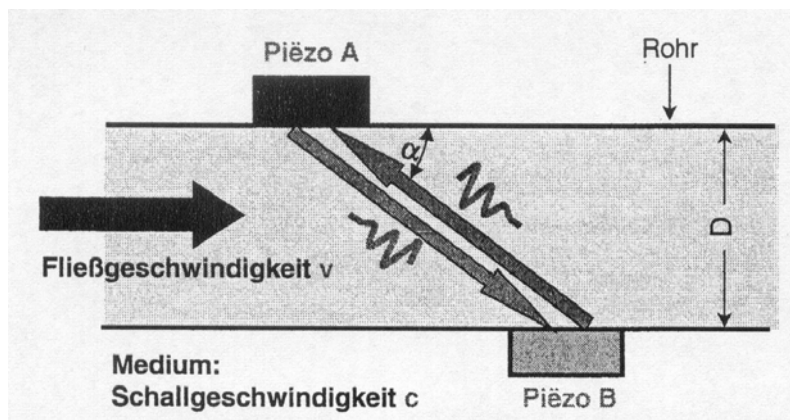
Erdung von elektrisch isolierten Elementen

2.7 Das Ultraschallverfahren

Mit Ultraschall bezeichnet man Schall oberhalb der menschlichen Hörgrenze. Als Grenzfrequenzbereich können die Frequenzen zwischen 20 kHz und 1 GHz benannt werden. Schwingungssignale noch höherer Frequenz werden als Hyperschall bezeichnet. Bei Schwingungen unterhalb des für Menschen hörbaren Bereiches spricht man dagegen von Infraschall. Schall kann sich in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern ausbreiten.

2.7.1 Das Laufzeitdifferenzprinzip

Das Laufzeitdifferenz Prinzip eignet sich zur Durchflussmessung. Die Laufzeit von Ultraschallimpulsen mit und gegen die Strömung, zwischen zwei ortsfesten Beobachtern, ist abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit. Die Laufzeitdifferenz der Ultraschallimpulse wird messtechnisch erfasst. Die Strömungsgeschwindigkeit wird letztendlich indirekt mathematisch ermittelt. Die Dichte des Mediums ist von der Temperatur und vom Druck abhängig und beide Größen wirken sich stark auf die Laufzeiten der Ultraschallwellen aus. Daher sind bei diesem Verfahren zusätzlich Temperatur- und Druckmessungen erforderlich.



$$t_{A \rightarrow B} = \frac{L_{AB}}{c_{A \rightarrow B}} = \frac{L}{c + v \cdot \cos \alpha}$$

$$t_{B \rightarrow A} = \frac{L_{BA}}{c_{B \rightarrow A}} = \frac{L}{c - v \cdot \cos \alpha}$$

$$\Delta t = t_{B \rightarrow A} - t_{A \rightarrow B} = \frac{2L \cdot v}{(c^2 - v^2 \cos^2 \alpha)} \cos \alpha$$

$$v = \Delta t \frac{L}{2 \cos \alpha \cdot t_{B \rightarrow A} + t_{A \rightarrow B}}$$

Für den Volumendurchfluss erhalten wir:

$$\dot{q} = \frac{(t_{B \rightarrow A} - t_{A \rightarrow B}) \pi D^3}{4 \sin(2\alpha) \cdot t_{B \rightarrow A} \cdot t_{A \rightarrow B}}$$

$$\dot{q} = \frac{\pi D^3}{4 \sin(2\alpha)} \cdot \frac{(t_{B \rightarrow A} - t_{A \rightarrow B})}{t_{B \rightarrow A} \cdot t_{A \rightarrow B}}$$

$$K = \frac{\pi D^3}{4 \sin(2\alpha)}; t_{B \rightarrow A} = t_1; t_{A \rightarrow B} = t_2$$

$$\dot{q} = K \frac{(t_{B \rightarrow A} - t_{A \rightarrow B})}{t_{B \rightarrow A} \cdot t_{A \rightarrow B}} = K \frac{\Delta t}{t_1 t_2}$$

Zur Erzeugung von Ultraschall eignen sich Schwingquarze, welche (Umkehr des Piezo-Effekts) elektrisch zu mechanischen Schwingungen angeregt werden. An einen Schwingquarz wird eine Wechselspannung mit der gewünschten Schwingfrequenz angelegt. Das Schwingen der Quarzoberfläche im Ultraschallbereich erzeugt die Welle, die sich durch das Medium fortpflanzt.

Das Beispiel aus der Praxis

OPTISONIC 3400 der Firma „KROHNE“ (Duisburg/Deutschland)



Das neue (2013) Inline-Ultraschall-Durchflussmessgerät für Flüssigkeiten arbeitet mit drei Messpfaden. Als Ultraschall-Durchflussmessgerät bietet der OPTISONIC 3400 die bidirektionale Durchflussmessung unabhängig von Leitfähigkeit, Temperatur, Dichte und Druck des Messstoffs. Das Gerät basiert auf dem Laufzeitdifferenzverfahren und besitzt drei parallele akustische bzw. Ultraschall-Pfade. Die drei Pfade ermöglichen die Messung unabhängig vom Strömungsprofil und liefern damit auch bei weniger günstigen Strömungsprofilbedingungen wie z. B. bei kurzen Einlauf- und Auslaufstrecken stets eine ausgezeichnete Genauigkeit. Im Durchflussbereich 0,3...20 m/s zeichnet sich der OPTISONIC 3400 durch eine Genauigkeit von +/- 0,3 % aus. Um den Anforderungen eines breiten Spektrums an Anwendungen gerecht zu werden, reicht der Temperaturbereich von -200...250 °C und die Viskosität kann bis 1000 cSt (centiStokes) betragen.

Messstoff	Flüssigkeiten	Flüssigkeiten	Gase, Dampf	Flüssigkeiten
Ausführung:	In Line-Zweistrahldurchflussmesser	5-Strahldurchflussmesser	Zweistrahldurchflussmesser	Ultraschall-Clamp-On-Durchflussmesser
Nennweite [DN [mm]]	25 bis 5000	100 bis 1000	50 bis 600	13 bis 5000
Für Durchflussmessung von ...bis(ca.)	0,5 m³/h... > 500.000 m³/h	30 m³/h.... > 10.000 m³/h	„Betriebs-m³“: 7 m³/h... 25.000 m³/h	0,3 m³/h... > 500.000 m³/h
Messfehler, typ.:	< 0,5% v. Messwert	< 0,15% v. Messwert	2% vom Messwert	2% v. Messwert
Reproduzierbarkeit:	< 0,2% v. Messwert	< 0,05% v. Messwert	< 0,5% v. Messwert	< 0,5% v. Messwert
Medientemperaturen:	≤ 170°C (200°C) Optionen: 500°C	≤ 120°C	Standard: 140°C Optionen: 500°C	< 280°C
Reynoldszahl-Bereich:	< 100 ... > 10 ⁶	< 100 ... > 10 ⁶	< 100 ... > 10 ⁶	> 10.000
Betriebsdruck:	< 1500 bar	Auf Anfrage	< 100 bar	nur begrenzt durch Prozessleitung
Medien:	Flüssigkeiten	Flüssigkeiten	Flüssigkeiten	Flüssigkeiten
Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen:	Ja	Ja	Ja	Hersteller-abhängig
Zugelassen nach OIML-R 117	Nein	Ja, eichpflichtiger Verkehr für Flüssigkeiten außer Wasser	Nein	Nein

2.7.2 Das Doppler Prinzip

Ein Ultraschallsender sendet eine kontinuierliche Ultraschallwelle in das Medium. Im Medium selbst müssen Kleinstpartikel oder Gasbläschen vorhanden sein. Dieses Ultraschall-Durchflussmesser-Verfahren eignet sich ideal für den Einsatz in Abwasser oder anderen verschmutzten Flüssigkeiten auf Wasserbasis. Ultraschall-Durchflussmesser können nicht den Volumenstrom von destilliertem Wasser, Trinkwasser oder reinen technischen Fluiden messen. Eine Erfassung von reinen Fluiden ist nur möglich, wenn diese belüftet werden und sich Bläschen bilden. Die dominanten Eigenschaften dieses Verfahrens sind:

- einfache Montage durch clamp-on Technik
- verschleißfrei
- verzögerungsfreie Messung
- geringer Energieeintrag in das Medium durch Pulsbetrieb
- keine Beeinflussung des Strömungsprofils
- Messung in trüben Fluiden (Blut, Eisenerzschmelzen)
- ein sehr geringer Druckabfall
- die chemische Kompatibilität und
- ein geringer Wartungsaufwand

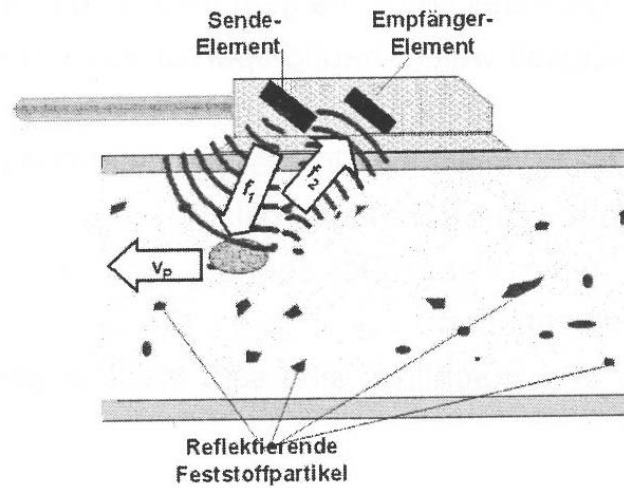
Für die Auswahl eines geeigneten Ultraschall-Durchflussmessers nach dem Doppler-Prinzip ergeben sich folgende Hauptfragen:

- Beträgt der Anteil der in der Flüssigkeit enthaltenen Partikel von mindestens 100 μm Größe mindestens 100 ppm?
- Benötigen Sie ein portables Messgerät oder eine kontinuierliche Prozessüberwachung?
- Benötigen Sie einen analogen Messausgang?
- Wie hoch ist der vom Durchflussmesser zu erfassende minimale und maximale Volumenstrom?
- Wie hoch ist die minimale und maximale Prozesstemperatur?
- Wie hoch ist der minimale und maximale Prozessdruck?
- Wie groß ist die Rohrleitung?
- Ist die Rohrleitung kontinuierlich gefüllt?

Zum Funktionsprinzip

Ein Ultraschallimpuls wird ausgesendet und an einem Kleinstpartikel reflektiert. Die reflektierte Ultraschallwelle verändert die Frequenz durch die Eigengeschwindigkeit v_p eines Kleinstpartikels oder eines Gasbläschen in einem Fluid.

Den gleichen Effekt kennen wir von einem Feuerwehrauto mit Sirene. Das auf uns zukommende Feuerwehrauto strahlt eine konstante Sirenen-Frequenz aus, jedoch empfangen wir mit unseren Ohren einen in der Frequenz steigenden Ton. Fährt das Feuerwehrauto von unserem Standort weg, dann wird der Ton tiefer. Diesen gehörten Frequenzunterschied nennen wir Dopplereffekt. Aus dieser Frequenzdifferenz kann die Geschwindigkeit (Fahrgeschwindigkeit des Feuerwehrautos oder die Strömungsgeschwindigkeit des Gases oder Fluides) bestimmt werden.



$$f_{\text{Empfang}} - f_{\text{Sender}} = \Delta f = \frac{2v_p f_{\text{Sender}}}{c} \cos \alpha$$

$$v_p = \Delta f \frac{c}{2 \cos \alpha * f_{\text{Sender}}}$$

$$dV = A dx$$

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dx}{dt} = A v_p = A * \Delta f \frac{c}{2 \cos \alpha * f_{\text{Sender}}} = \dot{V}$$



Messung der Strömungsgeschwindigkeit mittels Ultraschallmessung nach dem Doppler-Verfahren. Die Strömung wird nicht verändert, da die Ankopplung des Senders und des Empfängers an der Außenwand des Rohres erfolgt. Die Ultraschallwelle wird impulsartig ausgesendet, damit die Dispersionserscheinungen durch die Vielzahl der Kleinstpartikel vermieden werden und kein Wärmeeintrag durch das gebündelte Ultraschallsignal in das Medium erfolgt.

2.8 Laminar Flow Elemente

Der Vorteil von Aufnehmern, die nach dem Wirkdruckprinzip arbeiten, ist die schnelle Ansprechzeit. Ferner ist deren Robustheit von unschätzbarem Wert. Mechanische Blockaden von Rohrleitungen sind unmöglich und somit ist ein wichtiger Sicherheitsaspekt erfüllt. Fast würde man glauben, dass sind die idealen Aufnehmer zur Bestimmung eines Durchflusses, aber dem ist nicht so, denn:

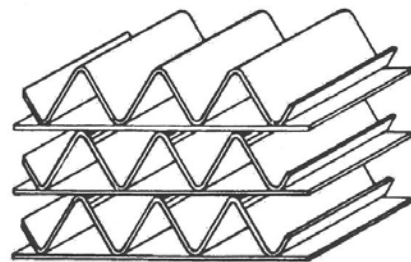
- Wenn kein ausreichender Differenzdruck aufgebaut werden kann, dann wird das Messverfahren unsicher. Diesen Umstand erleben wir, wenn in Gasen, speziell mit einer geringe Dichte, gemessen werden soll.
- Wirkdruckaufnehmer produzieren Druckverluste, d.h. dem Prozess wird Energie entzogen. Für viele Prozesse mag es unkritisch sein, jedoch haben wir Prozesse, die diesen Umstand nicht akzeptieren.
- Betrachtet man die Berechnungsformeln bei Wirkdruckaufnehmern, dann ist das Wurzelzeichen gut erkennbar. Wir haben eine nichtlineare Charakteristik. Geringe Differenzdrücke können sehr gut bestimmt werden, stiegen jedoch die Differenzdrücke, so ist die berechnete „Signalausbeute“ sehr gering.

Ergo: Ein Verfahren mit einer linearen Charakteristik wäre wünschenswert. Der Vorteil einer linearen Charakteristik ist die leichte und somit sichere Handhabung der Kalibrierung. Außerdem kann extrapoliert werden, was viele Messungen erleichtert bzw. die Anzahl der Messungen reduziert.

Als sogenannte „Lineargeräte“ sind, bei Durchflüssen von Gasen, die viskoseabhängigen Laminar Flow Elemente (LFE) oft im Einsatz. Aus Gründen von Fertigungstoleranzen werden LFE-Elemente nur kalibriert ausgeliefert. Der Anwender muss daher keine eigene Kalibrierung vornehmen.

2.8.1 Das LFE-Prinzip

Die LFE bestehen aus mehreren Kapillaren, mit sehr geringem Durchmesser ($d < 1\text{ mm}$) und typischen Längen von $80\text{ mm} < l < 200\text{ mm}$. Damit auch höhere Durchflüsse messbar sind, werden die Kapillaren gebündelt. Bei Durchflüssen von $q > 1\text{ l/min}$ werden geknickte Edelstahlbleche aufgerollt. Diese Anordnung bildet eine Edelstahlmatrix paralleler Kapillaren. In der klassischen Betrachtung werden LFE nach dem Gesetz

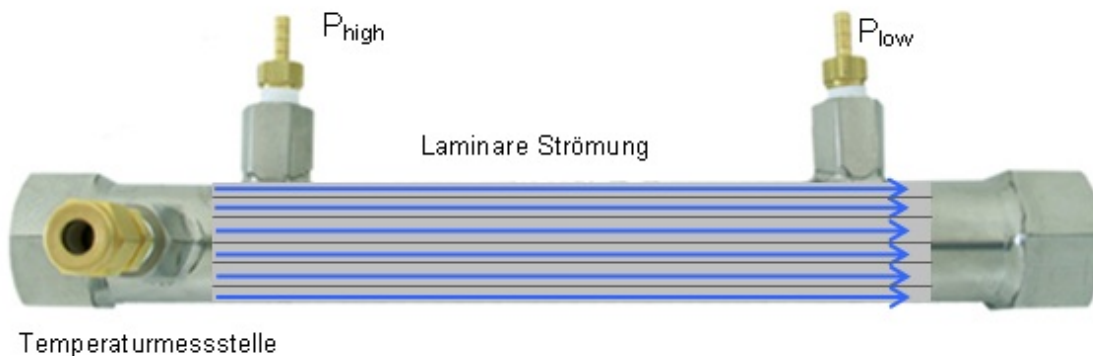


von Hagen-Poiseuille behandelt. Danach ist der Druckabfall im Idealfall bei laminaren Strömungen durch gerade Rohre proportional zum aktuellen Volumenstrom und zur dynamischen Viskosität des strömenden Mediums. Das Gesetz von Hagen-Poiseuille bezieht sich auf Newton'sche Flüssigkeiten. Bei Newton'schen Flüssigkeiten ist die Viskosität eine konstante Materialeigenschaft, sie ist jedoch von der Temperatur abhängig. Ein Beispiel für eine solche Flüssigkeit ist Wasser. Das Blutplasma ist auch eine Newton'sche Flüssigkeit, nicht aber das Blut selbst. Das Blut ist eine inhomogene Suspension aus verschiedenen Zellen im Plasma. Hier ist die Viskosität von der Größe der Schubspannung, also auch von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig.

$$\Delta p \sim \frac{dq}{dt} * \eta$$

$$\frac{\Delta p}{\dot{q} * \eta} = const.$$

Diese Idealbeziehung gilt nur für inkompressible Medien und für den Fall der Druckentnahme in der Kapillare im laminaren Strömungsprofil nach Ende der Beschleunigung in den Ein- und Auslaufbereichen der Messanordnung. Da die kritischen Längen mit $l_{\text{Einlauf}} = L_{\text{Rohr}} - 2 * 60 d_{\text{Rohr}}$ sehr lang sind, behilft man sich in der Praxis mit folgendem Aufbau:



Die Messungen der Drücke erfolgen vor und hinter der Kapillaren. Bei kleinen Kapillarlängen kann das Hagen-Poiseuille'sche Gesetz nicht mehr angewendet werden.

Um die erwünschte Linearität zu erhalten, sind zwei Kompensations- bzw. Korrekturverfahren möglich.

1. Betrieb bei Atmosphärendruck

Die Kompensation erfolgt über eine quadratische Gleichung der Form: $\dot{q} = a_0 * \Delta p + a_1 \Delta p^2$

Die Betriebstemperatur weicht in der Regel etwas von der Kalibriertemperatur ab, so dass sich auch die Viskosität des Betriebsmediums ändert. Diese Änderung wirkt sich auf den Durchfluss bei Betriebsbedingungen Q_{Betrieb} aus, der von der dynamischen Viskosität η abhängig ist. diesen Fehler gering zu halten, kompensiert man in der Regel hinsichtlich Temperatur. Diese Kompensation erreicht man durch folgenden einfachen Zusammenhang: $\dot{q}_{\text{Betrieb}} =$

$$\dot{q}_{\text{Calib}} \frac{\eta_{\text{Calib}}}{\eta_{\text{Betrieb}}}$$

2. Betriebsdruck größer 1,5 bar

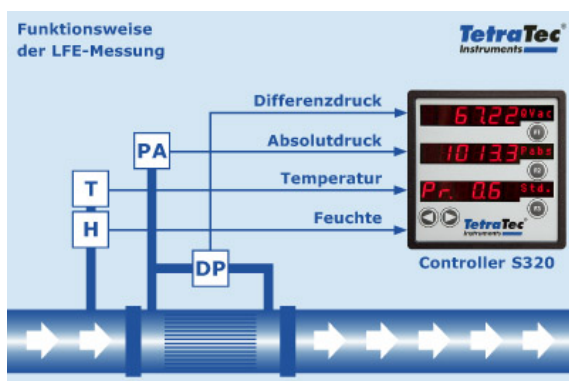
Sobald der Betriebsdruck 1,5 bar überschreitet, wird eine Kompensation nach Druck und Temperatur empfohlen. $\dot{q} \frac{\rho}{\eta} = a_0 x + a_1 x^2 + a_2 x^3$

$$x = \Delta p \frac{\rho}{\eta^2}$$

2.8.2 Charakteristischen Merkmale von Laminar Flow Elementen

- Messung kleinster Durchflüsse: Das Laminar Flow Element reagiert auch auf kleine Durchflussmengen. Ein Mindestdurchsatz ist nicht nötig, um ein Messergebnis zu erhalten.
- Bereichsspreizung bis 1:100 möglich: Mit einem Aufnehmer erreicht man eine Messbereichspreizung von 1:100 oder besser.
- Messung in beide Flussrichtungen: Durch Verwendung entsprechender Differenzdrucksensoren
- Unempfindlichkeit gegen Strömungspulse: Laminar Flow Elemente sind gegen pulsierende Strömungen unempfindlich. Der Durchflussmesswert wird über den Differenzdruck zwischen den beiden Messstellen am Anfang und Ende des Sensors ermittelt. Da der Systemdruck zwischen diesen beiden Messstellen als gleich groß angesehen werden kann, wird nur der tatsächlich anliegende Differenzdruck gemessen.
- Schnelles Ansprechverhalten: Jede Änderung des Durchflusses führt zu einer praktisch verzögerungsfreien Veränderung des Differenzdrucks.
- Geringer Druckverlust: Der Druckverlust kleiner Durchflussbereiche liegt bei maximal 10 mbar, für Nenndurchflussbereiche ab 3 l/min beträgt der Druckabfall maximal 20 mbar.
- Betriebsdruck bis 10 bar

2.8.3 Ein Beispiel eines Messaufbaus der Firma „TetraTec“



Beim Einsatz von LFE sollten folgende Punkte beachtet werden:

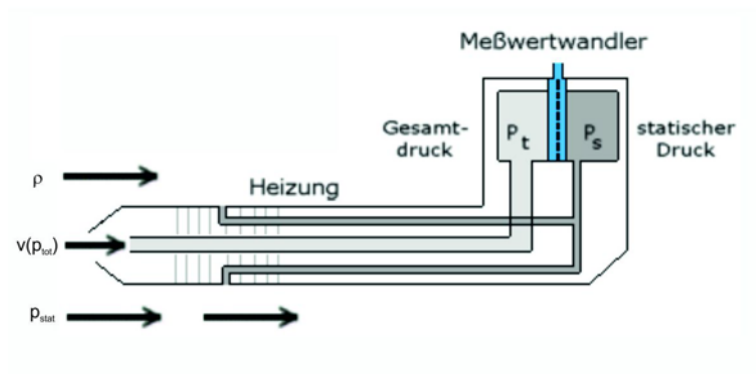
- Verschmutzungen: Das Laminar Flow Element reagiert empfindlich auf Verschmutzungen. Abhilfe: Die kleinen Kapillaren des Sensors können bei Bedarf durch Filter ($< 10\mu\text{m}$) geschützt werden.
- Installation: Beim Einbau sollte darauf geachtet werden, dass keine Kleberreste, Flusen oder Ähnliches in die Kapillaren gelangen kann.

2.9 Staudrucksonden

Staudrucksonden sind vor allem in verfahrenstechnischen Anlagen im Einsatz, also zum Beispiel in Kraftwerken, in chemischen und petrochemischen Anlagen, in Brauereien, Verbrennungsanlagen und Kläranlagen. Da Staudrucksonden Totvolumina aufweisen, werden sie in der Regel nicht für Lebensmittel oder andere sensible Produkte eingesetzt, sondern primär für Hilfsmedien wie Dampf, Druckluft, Heizwasser, Thermoöl, Rauchgas etc. Vorteilhaft gegenüber klassischen

Delta-p-Messverfahren wie Blenden, Venturis oder Düsen, ist der einfachere Einbau und der geringe Druckverlust.

Ein strömendes Medium drückt auf eine Membrane und erzeugt einen messbaren Druck. Der gemessene Druck ist abhängig von der Dichte des Mediums und dessen Strömungsgeschwindigkeit.



Nach Bernoulli gilt:

p_s = statischer Druck

p_{tot} = Staudruck

$$\Delta p = p_{tot} - p_{stat}$$

$$p_{stat} - \rho \frac{v^2}{2} = p_{tot}$$

$$v^2 = \frac{2 \Delta p}{\rho}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}}$$

2.9.1 Pitot-Rohr

Henri de Pitot arbeitete zu Beginn seiner Tätigkeit als Mathematiker und Astronom. Er beschäftigte sich mit Strömungen in Flüssen und Kanälen. Auf Basis der irrigen Annahme, die Fließgeschwindigkeit eines Gewässers würde mit der Tiefe zunehmen, ersann er ein Gerät, das diese Geschwindigkeit anzeigen konnte. Das Pitot-Rohr wurde später für die Schifffahrt zur Messung der Schiffsgeschwindigkeit eingesetzt. Im Prototyp wurde nur der Staudruck erfasst, da man davon ausging, wenn das Schiff sich nicht bewegt, nur der statische Druck des Wassers auf die Membrane wirkt. Da das Pitot-Rohr immer in der gleichen Tiefe den Druck gemessen hat, konnte das Prinzip für diesen Bedarfsfall akzeptiert werden. Eine Besonderheit hat diese Variante, denn sowohl die Vorwärts- als auch die Rückwärtsbewegung des Schiffs war nach diesem Verfahren messbar.

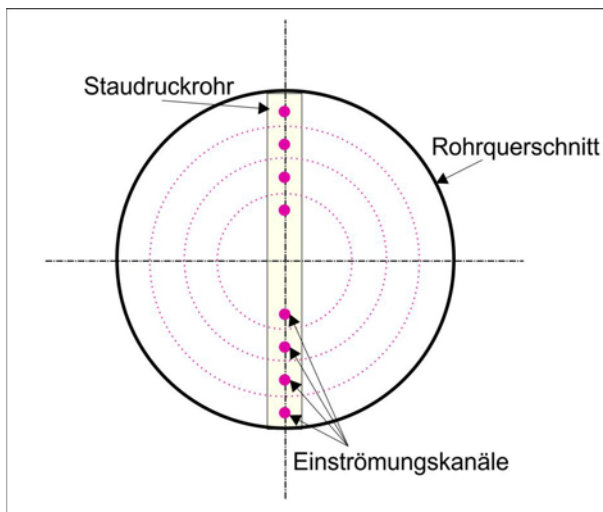


2.9.2 Das Prandtl'sche Staurohr

Das Prandtl'sche Staurohr erweitert das Pitot-Rohr um die Messung des statischen Drucks und somit ist dieses Verfahren universell einsetzbar. Außerdem hat das Prandtl'sche Staurohr eine Heizung, damit der Einlauf des Staurohres nicht vereist. Diese Variante wird häufig in der Luftfahrt verwendet.

2.9.3 Das Annubar-Prinzip

Eine Staudrucksonde nach dem Annubar-Prinzip (auch Annubar, Ellison-Annubar oder integrierendes Staurohr) ist eine Sonderform des Pitot-Rohres, die im Anlagenbau und in der Verfahrenstechnik zur Durchflussmessung verwendet wird. Bei Pitot-Rohr bzw. bei dem Prandtl'sches Staurohr haben wir eine punktuelle Messung. Das Annubar-Rohr besitzt auf die ganze Länge gleichförmig verteilte Einstromungsstellen. Nach dem Annubar-Prinzip werden Ringzonen im Strömungskanal gebildet. In jeder Ringzone erfolgen zwei Messungen. Diese Einzelmessungen werden gemittelt, sodass wir eine genauere Strömungsgeschwindigkeitsbestimmung über den ganzen Strömungskanal erhalten.



q_m = Massenstrom

K = Kalibrierkonstante

d = Innendurchmesser der Rohrleitung

Δp = Differenzdruck (Staudruck – statischer Druck)

ε = Expansionszahl

Bei inkompressiblen Fluiden ist die Expansionszahl gleich 1. Bei kompressiblen Fluiden ist die Expansionszahl im Bereich: $0,97 < \varepsilon < 1$ zu erwarten.

$$q_m = K \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2 \Delta p \rho}$$

2.10 Massestrommessung

Die Möglichkeiten, den Massestrom direkt zu messen, sind sehr eingeschränkt. In den letzten Jahren wurden zwei Prinzipien verfolgt:

- das Coriolisverfahren und
- das Verfahren nach dem Magnuseffekt.

Letztendlich hat sich das Coriolis Messverfahren durchgesetzt und obwohl die Anschaffungskosten recht hoch sind, ist ein Vorteil von unschätzbarem Wert: Das Medium, dessen Massenstrom gemessen wird, wird nicht verunreinigt, da es hermetisch und hygienisch verschlossen bleibt. Anwendungen in der Pharmazie und der Lebensmittelindustrie sind daher sehr prädestiniert.

2.10.1 Das Coriolisverfahren

Die Corioliskraft

In einem rotierenden System treten drei Scheinkräfte auf, die Zentrifugalkraft, die Zentripetalkraft und die Corioliskraft. Zentrifugal- und Zentripetalkraft wirken auf einer Ebene und können wie Skalare mathematisch behandelt werden.

Beide Kräfte sind beitragsgleich, wirken jedoch um 180° versetzt. Sie gehen auf die Newton'sche Grundgleichung zurück: $F = m * a$

Für rotationsbeschleunigte Systeme gilt:

$$a = \omega^2 r$$
$$F_z = m * \omega^2 r$$

F_z – Zentrifugalkraft

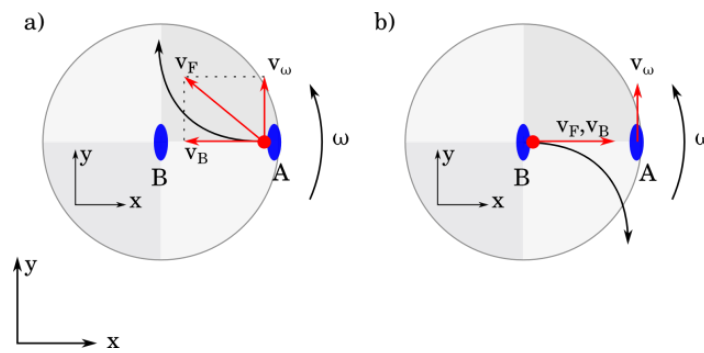
m – beschleunigte Masse

ω – Winkelgeschwindigkeit

r – Abstand der beschleunigten Masse von der Drehachse

Die Corioliskraft ist geschwindigkeitsabhängig und steht orthogonal auf dem Geschwindigkeits- und Rotationsvektor.

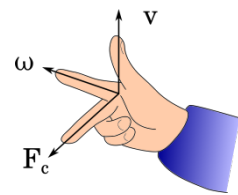
In der Grafik a) erfolgt die Bewegung vom Punkt A zum Punkt B. Wenn $\omega > 0$ ist, dann beschreibt die resultierende Geschwindigkeit, hervorgerufen durch die Kraftwirkung, eine nichtlineare Kurve nach oben. Ein gerade geworfener Ball vom Punkt A zum Punkt B würde, unter Beachtung der Richtung der Winkelgeschwindigkeit, nach rechts abdriften und somit den Punkt B nie treffen.



Geschwindigkeitsvektoren auf einer Drehscheibe

Wird der Ball vom Punkt B in Richtung A geworfen, so driftet er wiederum nach rechts, da die Richtung der Winkelgeschwindigkeit unverändert bleibt.

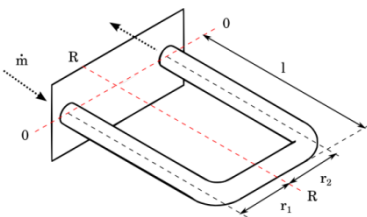
Im Jahre 1835 wurde erstmals die wirkende Scheinkraft von Gaspard Gustave de Coriolis erklärt und hergeleitet. Die Corioliskraft steht stets senkrecht auf den Geschwindigkeits- und Rotationsvektoren.



$$F_c = 2m(\vec{v} \times \vec{\omega})$$

Die mathematischen Grundlagen

Folgender mechanischer Aufbau ist gegeben. Ein Rohrstück ist gebogen und eine Masse strömt in das Rohr hinein und folglich auch heraus. Das Rohr wird elektro-mechanisch zum Schwingen angeregt. Die Schwingfrequenz ($\omega = 2\pi f$) wird dynamisch ermittelt und entspricht der Resonanzfrequenz f_o des Rohres.



Bezeichnungen:

0 – 0: Achse um die Einspannung des Rohrs

\dot{m} Massefluss im Rohr

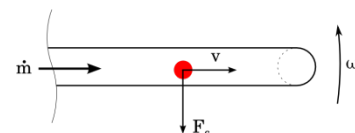
l Abstand des Messrohres von der 0-0 Achse

R-R: Mittelachse zwischen den Rohrschenkeln

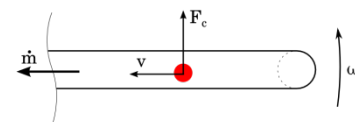
Folgende Größen wirken im schwingenden Zustand:

Sobald ein Massedurchsatz im Rohr erfolgt, beginnt das Rohr zu „schlingern“. Diese Bewegung erzeugt eine Phasenverschiebung der Schwingung zwischen Zu- und Ablauf im Rohr, was über die Abstandssensoren erfasst wird.

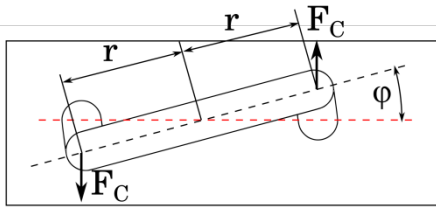
Zulauf



Ablauf



Das Drehmoment, das durch die Phasenverschiebung um die R-R Achse entsteht wird in folgender Grafik dargestellt:



r Abstand der Schenkel vom Scheitelpunkt der R-R Achse

φ Verdrehwinkel

F_c Corioliskraft

Aufgrund der Symmetrie gilt:

$$\begin{aligned}\sum M_i &= F_1 r_1 + F_2 r_2 \\ F_1 &= F_2 = F \\ M_i &= 2Fr \\ \text{mit } \alpha &= 90^\circ \\ M &= 2 * 2 * m * v * \omega * \sin(90^\circ) * r \\ M &= 4mv\omega r\end{aligned}$$

Weiterhin gilt:

$$\begin{aligned}v &= \frac{L}{t} \quad \text{und} \quad \dot{m} = \frac{m}{t} \\ \dot{m} &= \frac{mv}{L} \\ m &= \dot{m}L \frac{1}{v}\end{aligned}$$

v Durchflussgeschwindigkeit

L Biegelänge des Rohres

t Dauer des Durchflusses eines Moleküls

m Masse des Rohrinhalts

$$\begin{aligned}M &= 4\dot{m}L \frac{1}{v} v\omega r \\ M &= 4\dot{m}L\omega r\end{aligned}$$

Da es sich beim Rohrstück um einen Drehschwinger handelt, wird folgende Formel für die weiteren Betrachtungen angenommen:

Federsteifigkeit des Rohres k_S

Verdrehwinkel des Rohres φ

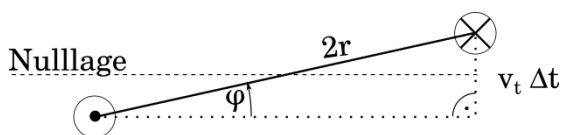
Torsionsmoment T_T $T_T = k_S \varphi$

bei maximalem Winkel gilt: $T_T = M$

$$k_S \varphi = 4\omega r \dot{m} L$$

$$\dot{m} = \frac{k_S \varphi}{4\omega r L}$$

Der Verdrehwinkel und die Geschwindigkeit des Rohres beim Nulldurchgang sind geometrisch miteinander verknüpft.



Die Größe Δt ist die Zeitdifferenz der Nulldurchgänge beider Rohrschenkel. Sie ist ein direktes Maß für die Phasenverschiebung.

$$\sin \varphi = \frac{v_t}{2r} \Delta t$$

Die Größe v_t ist die Geschwindigkeit beim Nulldurchgang.

Die Amplitude der Schwingung ist sehr klein und aus der Erfahrung kleiner als 5° . Somit kann die Kleinnäherung angewendet werden.

l – ist der Abstand des Messaufnehmers von der Drehachse

$$v_t = \omega l$$

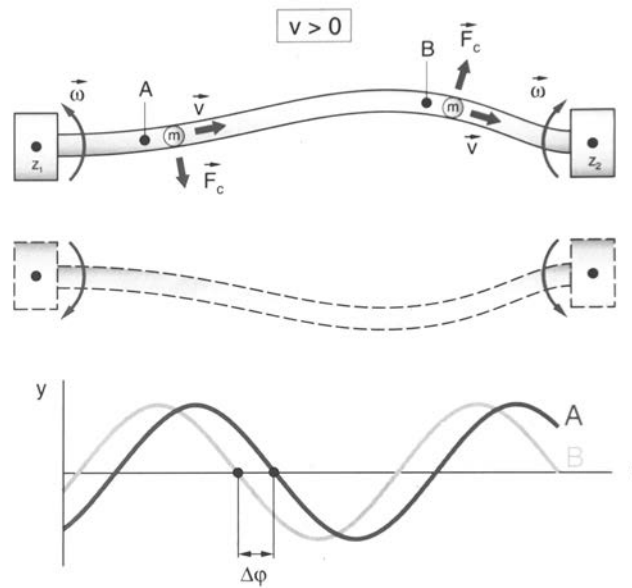
$$\varphi = \frac{\omega l}{2r} \Delta t$$

$$\dot{m} = \frac{k_S}{4\omega r L} \frac{\omega l}{2r} \Delta t$$

Die Lösung: $\dot{m} = \frac{k_S l}{8r^2 L} \Delta t$

Interpretation der Lösung:

- Die Bestimmung des Massedurchflusses ist unabhängig von der Winkelgeschwindigkeit ω .
- Die Geometrie des Aufbaus und das Zeitintervall bestimmen die Massedurchflussgröße.
- Der Massedurchfluss lässt sich aus dem Zeitintervall zweier Nulldurchgänge des schwingenden Rohres bestimmen.



Bewegung der Masse m zwischen den Punkten A und B

Pro und Contra

Vorteile des Verfahrens

- universal einsetzbar für Flüssigkeiten und Gase
- keine Temperatur- und Druckmessung notwendig
- unabhängig von Dichte und Viskosität
- hohe Messgenauigkeit, typische Ungenauigkeit bei Messungen $F_{rel} < 0,1\%$
- multivariable Sensorentechnik; Massedurchfluss, Dichte und Temperatur parallel messbar
- unabhängig vom Strömungsprofil
- hygienischer Aufbau

Nachteile des Verfahrens

- hoher Anschaffungspreis
- umfangreicher Installationsaufwand
- eingeschränkter Temperaturbereich
- problematische Messungen bei Mischphasenmedien

2.10.2 Das Verfahren nach dem Magnus Effekt

Der deutsche Physiker Heinrich Gustav Magnus (1802-1870) entdeckte den Effekt zwar nicht, konnte ihn aber als erster vollständig erklären. Hin und wieder begegnet uns der Effekt in diversen Ballsportarten. Er ist verantwortlich für gekrümmte Ballflugbahnen beim Fußball, Golf und Baseball. Die unterschiedliche Umströmung der nicht ganz glatten Oberflächen und die nicht exakten Kugelformen der Sportgeräte sind dafür entscheidend.

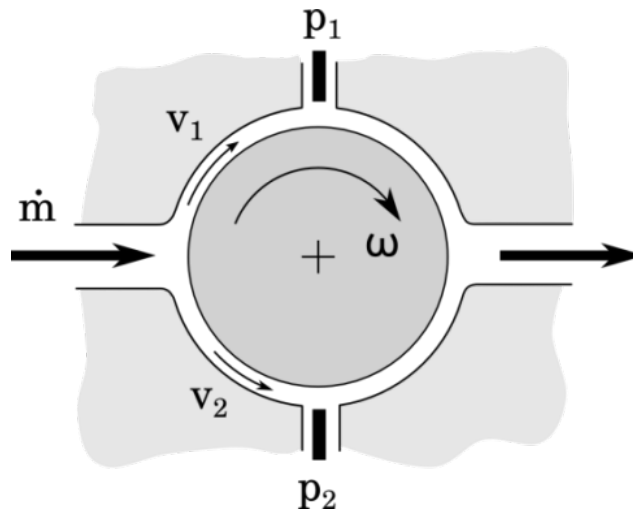
ω – Winkelgeschwindigkeit

\dot{m} – Massefluss

v_1, v_2 – Strömungsgeschwindigkeiten

p_1, p_2 – lokale Drücke

Ein Zylinder, der mit konstanter Winkelgeschwindigkeit rotiert, wird von einem Fluid umströmt. Der Gesamtstrom teilt sich in zwei Teilströme auf, die aufgrund der Zylinderrotation unterschiedliche Geschwindigkeiten v_1 und v_2 haben.



Masseflussaufnahme nach dem Magnuseffekt

Es gelten folgend Beziehungen:

$$v_1 = v_0 + v_\omega$$

$$v_2 = v_0 - v_\omega$$

Dabei entsprechen v_0 der Geschwindigkeit des Zylinders im Ruhezustand und v_ω der Geschwindigkeitsänderung, die durch die Rotation des Zylinders verursacht wird.

Durch die unterschiedlichen Geschwindigkeiten herrschen in beiden Kanälen verschiedene statische Drücke, die über Druckaufnehmer erfasst werden. Somit erhalten wir für den Differenzdruck:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \frac{\rho}{2}(v_1^2 - v_2^2) = 2\rho v_0 v_\omega$$

$$\Delta p \sim \rho \dot{V} = \dot{m}$$

3. Leistungsmerkmale verschiedener Verfahren

3.1 Leistungsmerkmale der Staudrucksonde (Fa. WiKA)

- Geeignet für Flüssigkeits-, Gas- und Wasserdampf-Durchflussmessung
- Genauigkeit $\pm 2 \%$ der tatsächlichen Fließgeschwindigkeit
- Wiederholbarkeit der Messung 0,1 %
- Diese Elemente garantieren den geringsten Druckverlust in der Familie der primären Durchflusselemente (ca. $< 1 \%$).

3.2 Leistungsmerkmale des Venturirohrs (Fa. WiKA)

- Geeignet für Flüssigkeits-, Gas- und Wasserdampf-Durchflussmessung
- Genauigkeit $\leq \pm 0,5 \%$ der tatsächlichen Fließgeschwindigkeit
- Wiederholbarkeit der Messung 0,1 %
- Diese Elemente garantieren den geringsten Druckverlust in der Familie der primären Durchflusselemente.
- Kalibrierung kann im Bedarfsfall durchgeführt werden
- Keine mechanische Blockade möglich

3.3 Leistungsmerkmale der Normblende (Fa. WiKa)

- Maximale Betriebstemperatur bis 800 °C
- Maximaler Betriebsdruck bis 400 bar
- Geeignet für die Durchflussmessung von Flüssigkeiten, Gas und Wasserdampf
- Genauigkeit $\leq \pm 0,5 \%$ der tatsächlichen Fließgeschwindigkeit
- Wiederholbarkeit der Messung von 0,1 %
- Keine Kalibrierung notwendig bei der Verwendung von Normblenden
- Keine mechanische Blockade möglich

3.4 Leistungsmerkmale der Venturidüse (Fa. WiKa)

- Geeignet für die Durchflussmessung von Flüssigkeiten, Gas und Wasserdampf
- Optimale Lösung zur Durchflussmessung von Wasserdampf
- Genauigkeit $\leq \pm 0,1 \%$ der tatsächlichen Fließgeschwindigkeit
- Wiederholbarkeit der Messung 0,1 %
- Diese Elemente garantieren den geringsten Druckverlust in der Familie der Differenzdruck-Messumformer.
- Keine mechanische Blockade möglich

3.5 Leistungsmerkmale der Annubar Mass ProBar Durchflussmesser

- Kombiniert den multivariablen Rosemount Massedurchfluss Messumformer 3095MV mit dem Annubar Wirkdruckgeber Rosemount 485
- Genauigkeit bis zu 0,9 % vom Messwert des Massedurchflusses bei Gas und Dampf
- Messung von Differenzdruck, statischem Druck und Prozesstemperatur, mit nur einem Anschluss an die Rohrleitung
- Dynamische Berechnung des kompensierten Massedurchflusses
- Ideal geeignet für Anwendungen mit Gas und Dampf

4. Auswahlkriterien für bestimmte Verfahren

Neben der Temperatur- und Druckmesstechnik hat die Durchflussmesstechnik die größte Bedeutung von den industriellen Messgrößen.

4.1 Allgemein gültigen Anforderungen

Diese Auflistung bestimmter Wunscheigenschaften wird nicht weiter kommentiert oder bewertet. Mit hoher Wahrscheinlichkeit gibt es keine Messaufbauten oder Verfahren, die alle Punkte zur vollsten Zufriedenheit anbieten. Es muss immer ein vernünftiger Kompromiss geschlossen werden. Die folgende Liste entspricht den typischen praktischen Erfordernissen aus dem Maschinenbau. Sicherlich gibt es in der Lebensmittelindustrie oder der Pharmazie andere wichtige Kriterien, wie z.B. die umfangreichen hygienischen Vorschriften.

- hohe Genauigkeit der Messungen – Zielwert: 0,5% über die gesamte Messstrecke
- große Messspanne (Verarbeitung von dynamischen Signalen) – Zielwert: 1:10
- integrierendes Verhalten
- kalibrierfreie Messtechnik – Vermeidung von Aus- und Wiedereinbau
- lineare Charakteristik zwischen Durchfluss und Messsignal
- einfache Handhabung der Messtechnik beim Einbau – geringes Gewicht
- Wartungsfreiheit
- Beständigkeit gegenüber dem Medium – keine chemischen Reaktionen, keine abrasiven Effekte
- keine Verstopfungen, keine mechanischen Blockaden
- keine Notwendigkeit von langen Ein- und Auslaufstrecken
- keine festen oder bewegten Teile, die Verwirbelungen des Mediums verursachen
- kein Druckverlust in einer Leitung durch eingebaute Messtechnik
- Ex-Schutz Varianten müssen verfügbar sein
- Preis-Leistungsverhältnis muss akzeptabel sein
- akzeptable Lieferzeiten (Verfügbarkeit)
- genormte Bauvorschriften
- klare Richtlinien für den Bau der Gerätetechnik
- Selbstdiagnosefähigkeit der eingesetzten Elektronik
- adaptierte Schnittstelle für mögliche Computertechnik-Anschlüsse

4.2 Auswahlkriterium – Prozessumfeld „Regelkreis“

- Trägheit, Zeitkonstante – wann steht der neue Messwert zur Verfügung?
- Momentanwertmessung oder Mittelwertmessung (integrierendes Verhalten)
- hohe Auflösung bei kleinen Abfüllmengen
- Messungen von impulsartigen Durchflüssen
- Messungen von konstantem Durchfluss

4.3 Auswahlkriterium – Fehlergrenzen

- Die Genauigkeit: Die Genauigkeit der Durchflussmessung beschreibt die Qualität der Übereinstimmung des Messwertes mit der tatsächlichen Prozessgröße. Die Genauigkeit wird durch einen Messfehler beschrieben.
- Der absolute Messfehler: Der absolute Messfehler ist die Differenz zwischen dem Messwert (Ist-Wert) und dem unbekannten wahren Wert (Soll-Wert).
- Der relative Messfehler: Der relative Messfehler ergibt sich aus dem Quotienten von absolutem Messfehler zu wahren Wert.
- Die Fehlergrenzen: Hier muss unterschieden werden, ob die maximalen Fehlergrenzen angegeben werden oder die typischen. Die typischen Fehlergrenzen sind statistische Werte. Die typischen Fehlergrenzen werden aus einem Gerätelos bestimmt, dies bedeutet nicht, dass jedes Gerät innerhalb dieser Grenzen auch den auftretenden maximalen Fehler haben muss.
- Der Messbereich: Der maximal mögliche Durchfluss muss mit der höchsten Genauigkeit dargestellt werden. Werden im binären Code 800l/s mit 216-1 Bit abgebildet, so ist der kleinste messbare Durchfluss mit einem Bit darstellbar. In diesem Fall: 0,0122 l/s.
- Die Reproduzierbarkeit: Dieser Parameter bestimmt die Differenz zwischen zwei Messungen, mit gleichem Messaufbau unter gleichen Bedingungen. Die Reproduzierbarkeit ist immer wesentlich besser als dessen Genauigkeit des Durchflussmessers.

4.4 Vergleich verschiedener Messverfahren

Eigenschaft	Magn.-Indukt. Durchflusm.	Masse Durchflusm.	Wirbel-Zähler	Wirtdruck-Verfahren	Verdrängungs-Durchflusm.	Turbinen Durchflusm.	Schwebekörper Durchflusm.	Ultraschall Durchflusm.
Genauigkeit	± 0,2 - 1% v.M.	0,2 - 0,3 v.M.	± 1% v.M. über Re = 20000	± 0,5 - 1% v.E.	± 0,2 - 0,5% v.M.	± 0,2 - 1% v.M.	± 2% v.E.	± 1 - 2% v.E.
Reproduzierbarkeit	± 0,1 - 0,2%	0,1 - 0,2%	± 0,2%	± 0,5%	± 0,02 - 0,05%	± 0,05 - 0,2%	± 1%	± 0,5%
Dynamik	100:1	10:1	40:1 Flüssigk. 15:1 Gas	4:1	10:1	10:1	10:1	20:1
Minimal Geschwindigkeit	unter 0,1 m/s	unter 0,1 m/s	Flüssigkeiten um 0,4 m/s	vom Max. Wert abhängig	0,2 m/s	0,8 m/s	0,5 m/s	0,1 m/s
Maximal Geschwindigkeit	12,5 m/s	10 m/s	9 m/s Flüssigk. 60 m/s Gas	8 m/s Flüssigk. 50 m/s Gas	5 m/s Flüssigk. 30 m/s Gas	9 m/s Flüssigk. 50 m/s Gas	8 m/s Flüssigk. 30 m/s Gas	10 m/s Flüssigk. 60 m/s Gas
Druckverlust	praktisch Null	abhängig vom Gerät	1 - 2 Staudrücke	4 - 6 Staudrücke	2 - 4 Staudrücke	1 - 2 Staudrücke	1 - 2 Staudrücke	praktisch Null
Nennweiten	2,5 - 3000 mm	3 - 150 mm	15 - 300 mm	25 - 2000 mm	3 - 500 mm	5 - 300 mm	3 - 100 mm	6 - 3000 mm
Kalibrierung	kalibriert	kalibriert	kalibriert	unkalibriert	kalibriert	kalibriert	kalibriert/ unkalibriert	meist kalibriert
Signalausgänge	Analog Puls Frequenz	Analog Frequenz, Puls	Analog- oder Zähl Ausgang	Analog- Ausgang	Zähl- Ausgang	Zähl- Ausgang	Analog- oder Lokalanzeige	Analog- oder Zähl- Ausgang
Einzelbar in	leitenden Flüssigkeiten	Flüssigkeiten und Gase	Flüssigkeiten Gas und Dampf	Flüssigkeiten Gas und Dampf	Flüssigkeiten oder Gase	Flüssigkeiten oder Gase	Flüssigkeiten oder Gase	Flüssigkeiten oder Gase
Temperaturmitte	-40 bis 180°C	-200 bis 240°C	-200 bis 400°C	-20 bis 500°C	10 bis 100°C	-100 bis 300°C	10 bis 100°C	10 bis 100°C
Maximal Drücke (Standard)	16/40 bar	40 bar	40 bar	24 bar	16 bar	40 bar	10 bar	16 bar